Élaboration et structure de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt

Forêts Canada
Groupe de travail sur les dangers d'incendie

Rapport d'inform ST-X-3F

Forêts Canada Forestry Canada

Canada

C-1

C-2

C-3

C-4

C-5

C-6

C-7

D-1

Élaboration et structure de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt

Forêts Canada
Groupe de travail sur les dangers d'incendie

Rapport d'information ST-X-3F

Publié par
Forêts Canada
Direction générale des sciences et du développement durable
Ottawa, 1992

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1992
ISBN 0-662-97666-5
ISSN 1192-1072
Numéro de catalogue Fo29-33/3-1992F

Il est possible d'obtenir sans frais des exemplaires de cette publication auprès de:

Forêts Canada
Centre d'information
Ottawa (Ontario)
K1A 1G5

Téléphone: (819) 953-2312
Télécopieur: (819) 953-7048

Des microfiches ou copies de cette publication sont en vente chez:

Micromédia Ltée
165, Hôtel-de-Ville
Hull (Québec)
J8X 3X2

Révision et production : Denis Rochon
Mise en page : Francine Langevin, Diane Sirois

Also available in English under the title *Development and Structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System*

Données de catalogage avant publication (Canada)

Canada. Forêts Canada. Groupe de travail sur les dangers d'incendie

Élaboration et structure de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt

(Rapport d'information; ST-X-3F)
Publ. aussi en anglais sous le titre : Development and Structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System.
Comprend un résumé en anglais.
Comprend des références bibliographiques.
ISBN 0-662-97666-5
N° de cat. MAS Fo29-33/3-1992F

1. Forêts — Incendies — Prévision. 2. Forêts — Incendies — Prévention et maîtrise.
I. Canada. Forêts Canada. Direction générale des sciences et du développement durable.
II. Canada. Forêts Canada. III. Titre. IV. Coll. : Rapport d'information (Canada. Forêts Canada. Direction générale des sciences et du développement durable); ST-X-3.

SD421.3603214 1992 634.9'618'0971 C92-099737-6

Photos des pages 2 et 3 de la couverture :
Les 16 types de combustibles de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt.

Imprimé sur du papier recyclé

Table des matières

Résumé/Abstract 9

Préface 9

1.0 Introduction 10

2.0 Structure de la Méthode PCI 11

3.0 Base de données de la Méthode PCI 13

4.0 Description des types de combustible 13

4.1 Terminologie des types de combustibles 14
4.2 Descriptions détaillées des types de combustibles selon la Méthode PCI 14

4.2.1 Groupe des conifères 14
4.2.2 Groupe des feuillus 18
4.2.3 Groupe des forêts mixtes 18
4.2.4 Groupe des rémanents 18
4.2.5 Secteurs ouverts 19

5.0 Modes de calcul de l'indice du combustible léger 19

6.0 Humidité foliaire 20

7.0 Composantes principales 24

7.1 Consumation initiale de combustible 24
7.2 Vitesse de propagation 28

7.2.1 Équations fondamentales de la vitesse de propagation 28

7.2.1.1 Combustibles naturels et combustibles dus à la coupe 28
7.2.1.2 Combustibles des plantations 32
7.2.1.3 Combustibles herbacés 32

7.2.2 Effet de la pente sur la propagation de l'incendie 34
7.2.3 Effet du combustible disponible sur la vitesse de propagation 37
7.2.4 Effet du feu de cimes sur la vitesse de propagation 39

7.2.4.1 Transition entre l'incendie de surface et le feu de cimes 39

7.2.5. Plantation de conifères — combustible C-6 40

7.2.5.1 Effet de l'humidité foliaire sur la propagation du feu de cimes 41
7.2.5.2 Vitesse de propagation de l'incendie dans une plantation de conifères 41

7.3 Consumation finale 42
7.4 Intensité du front de l'incendie 43
7.5 Description de l'incendie 44

8.0 Composantes secondaires 44

8.1 Extrapolation de la croissance de l'incendie à partir d'un foyer ponctuel; accélération 45
8.2 Extrapolation de la croissance des foyers linéaires 48
8.3 Vitesse de propagation sur l'arrière de l'incendie 48
8.4 Croissance de l'incendie elliptique 49

8.4.1 Forme de l'aire incendiée 49
8.4.2 Formulation d'un modèle simple de croissance elliptique de l'incendie 50
8.4.3 Calcul de l'aire brûlée 51
8.4.4 Calcul du périmètre 51
8.4.5 Intensité de l'incendie, sur l'arrière et sur les flancs 52

9.0 Remarques finales 52

10.0 Bibliographie 53

Annexe I. Liste des équations 57

Annexe II. Liste des symboles 65

Illustrations

Figures

1. Structure de la Méthode de prévision du comportement des incendies de forêt 11

2. Les trois modes du calcul de l'indice du combustible léger (*ICL*) dans le sous-système Humidité des combustibles accessoires de la MCEDIF 21

3. Courbes de la consumation des combustibles en fonction de l'*ICD*, asymptotiques et en forme de S pour les combustibles C-1, C-2, C-3, C-4, C-5, C-6, M-3, M-4 et D-1 26

4. Courbes de la consumation du sol forestier en fonction de l'*ICD* ainsi que de la consumation des combustibles ligneux en fonction de l'*ICD*, asymptotiques et en forme de S pour les rémanents 27

5. Courbes de la vitesse fondamentale de propagation en fonction de l'*IPI* pour les combustibles C-1 à C-6 29

6. Courbes de la vitesse fondamentale de propagation en fonction de l'*IPI* pour les combustibles C-7, D-1, S-1, S-2 et S-3 30

7. Courbes de la vitesse fondamentale de propagation en fonction de l'*IPI* pour les combustibles des types M-1 à M-4 31

8. Relation entre le taux de fanage des herbes et son coefficient 33

9. Relation entre l'*IPI* et la vitesse fondamentale de propagation dans les herbes coupées (ou aplaties) complètement fanées (O-1a) 33

10. Relation entre l'*IPI* et la vitesse fondamentale de propagation dans les herbes hautes (sur pied) complètement fanées (O-1b) 33

11. Relation entre le pourcentage de pente du terrain et le coefficient de propagation servant à corriger la vitesse de propagation de l'incendie sur les terrains en pente (Van Wagner, 1977) 35

12. Équivalent vitesse du vent en fonction du pourcentage mesuré de la pente, pour plusieurs types de combustibles 36

13. L'effet d'accumulation en fonction de q et de l'ICD_0 pour les combustibles C-1, C-4 et S-1 38

14. Effet de l'*ICD* sur la vitesse de propagation du feu dans un combustible de type C-2 38

15. Fonction de la transition (fraction consumée des cimes) déterminant le degré de consumation des cimes. 40

16. Modèle à deux équations de la vitesse de propagation de l'incendie dans le combustible C-6 41

17. Modèle d'accélération de l'incendie dans un combustible ouvert 46

18. Temps écoulé avant la vitesse de propagation à l'équilibre ($V_{p.éq.}$) en fonction de la fraction consumée des cimes dans les couverts fermés 47

19. Modèle d'accélération sous couvert fermé 47

20. Schéma du modèle simple de croissance elliptique de l'incendie 49

21. Rapport de la longueur à la largeur des aires incendiées elliptiques dans les peuplements forestiers et les rémanents, en fonction de la vitesse du vent 50

22. Rapport de la longueur à la largeur des aires incendiées elliptiques en fonction de la vitesse du vent dans deux types généraux de combustibles, selon les équations [79] et [80] 50

Diagrammes

1. Composantes principales de la Méthode PCI 24

2. Consumation initiale 24

3. Vitesse fondamentale de propagation 28

4. Indice de propagation initiale 34

5. Corrections de la vitesse de propagation 37

6. Sous-programme « feu de cimes » 39

7. Consumation finale 42

8. Calcul de l'intensité du front de l'incendie 43

9. Composantes secondaires de la Méthode PCI 44

10. Croissance d'un incendie à foyer ponctuel 45

11. Croissance d'un incendie à foyer linéaire 48

Tableaux

1. Ventilation de la base de données de la Méthode PCI 12
2. Types de combustibles selon la Méthode PCI 13
3. Caractéristiques des types de combustibles dans la Méthode PCI 16
4. Sources de données au Canada sur le minimum printanier de la teneur en humidité dans le feuillage des conifères 22
5. Teneur moyenne en humidité, au moment du minimum printanier, dans le vieux feuillage des conifères des six premières localités énumérées au tableau 4 et date moyenne où on observe ce minimum (D_0) 22
6. Valeurs des coefficients de la vitesse de propagation pour tous les types de combustibles sauf les peuplements mixtes 32
7. ICD_0, q et EA maximal de chaque type de combustible 38
8. Hauteur de la base de la couronne (*HBC*) et quantité de combustible dans les cimes (*QCC*) pour les combustibles donnant lieu aux feux de cimes 39

Résumé

La Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt (PCI) fait partie de la Méthode canadienne d'évaluation des dangers d'incendie de forêt, laquelle englobe également la Méthode canadienne de l'Indice Forêt-Météo (IFM). La première de ces trois méthodes permet l'estimation quantitative de la vitesse de propagation du front de l'incendie (ou suivant la pente), la consumation de combustible, l'intensité de l'incendie et la description de ce dernier; avec l'aide du modèle elliptique de croissance de l'incendie, elle permet d'estimer l'aire et le périmètre de l'incendie, la vitesse de croissance de ce dernier ainsi que le comportement de l'incendie sur ses flancs et son arrière. Depuis le milieu des années 70, la Méthode PCI a évolué, à partir d'une série d'indices de combustion élaborés à l'échelon régional jusqu'à sa forme achevée actuelle en passant par sa publication sous forme de méthode nationale provisoire, en 1984. On tient compte de 16 types précis de combustibles, qui englobent la plupart des principaux types trouvés dans les forêts boréales du Canada. Les modèles du comportement des incendies, en ce qui concerne la vitesse de propagation et la consumation des combustibles, sont tirés d'un corpus de plus de 400 observations d'incendies expérimentaux, échappés et dirigés. La Méthode PCI devrait servir à étayer l'expérience et le jugement des chefs de l'intervention contre les incendies.

Abstract

The Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System is a subsystem of the larger Canadian Forest Fire Danger Rating System, which also includes the Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System. The FBP System provides quantitative estimates of head fire spread rate, fuel consumption, fire intensity, and fire description; with the aid of an elliptical fire growth model, it gives estimates of fire area, perimeter, perimeter growth rate, and flank and back fire behavior. The FBP System has evolved since the mid-1970s from a series of regionally developed burning indexes to an interim edition of the nationally developed FBP System issued in 1984 to the present complete edition. Sixteen discrete fuel types are included, covering most major boreal forest fuel types in Canada. Fire behavior models for spread rate and fuel consumption were derived from a database of over 400 experimental, wild, and prescribed fire observations. The FBP System is intended to supplement the experience and judgment of operational fire managers.

Préface

La Méthode canadienne d'évaluation des dangers d'incendie de forêt (MCEDIF) dont fait partie la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt (PCI), a été élaborée par les membres du groupe de travail sur le danger d'incendie de Forêts Canada. Ce groupe de travail national est constitué d'au moins un membre de chacun des établissements de Forêts Canada ayant mis sur pied un programme de recherche sur les incendies. Les membres qui peuvent revendiquer la paternité de la méthode PCI sont :

Charles E. Van Wagner
Institut forestier national de Petawawa
Chalk River (Ontario)

Brian J. Stocks
Centre de foresterie des Grands-Lacs
Sault Ste. Marie (Ontario)

Bruce D. Lawson
Centre de foresterie du Pacifique
Victoria (Colombie-Britannique)

Martin E. Alexander
Centre de foresterie du Nord
Edmonton (Alberta)

Timothy J. Lynham
Centre de foresterie des Grands-Lacs
Sault Ste. Marie (Ontario)

Robert S. McAlpine
Institut forestier national de Petawawa
Chalk River (Ontario)

La Méthode PCI est fondée sur les données du comportement des incendies qui ont collectées lors de travaux expérimentaux de brûlage ou extraites de la documentation sur les feux échappés. Les données de cette nature sont difficiles à obtenir et elles n'ont pu être recueillies que grâce à l'appui logistique et à la collaboration indéfectible de l'ensemble des organismes canadiens de lutte contre les incendies de forêt.

L'élaboration de la Méthode a considérablement profité de l'informatisation, laquelle a permis de vérifier en long et en large les algorithmes et les procédures. Derry McKenna, programmeur chargé de l'informatisation de la Méthode, a succombé à la maladie de Hodgkin peu après avoir parachevé la première version de travail du programme.

1.0 Introduction

L'élaboration de moyens d'évaluer le risque journalier d'incendie de forêt a été le pain quotidien de Forêts Canada et des organismes qui l'ont précédé depuis le milieu des années 20. Au cours des quatre décennies qui ont suivi, quatre méthodes d'évaluation du risque se sont succédé et ont servi à un degré variable dans l'ensemble du Canada. La présente méthode, la Méthode canadienne d'évaluation des dangers d'incendie de forêt (MCEDIF), a germé en 1968 avec l'adoption d'une voie d'approche modulaire complète (Muraro, 1969), qui donnait la possibilité d'élaborer et d'améliorer des parties distinctes de l'ensemble, de façon indépendante les unes des autres. Tous les éléments de la Méthode, parachevés dès 1987, ont été amalgamés dans une reliure officielle (Service canadien des forêts, 1987) à laquelle de nouveaux volets pouvaient venir se greffer. Stocks et collab. (1989) présentent une description actualisée de l'ensemble de cette méthode.

Le premier volet important à avoir été parachevé a été la Méthode canadienne de l'Indice Forêt-Météo (IFM), d'abord adoptée dans l'ensemble du pays en 1971 et révisée plusieurs fois depuis; elle permet une mesure relative de l'humidité du combustible ainsi que du comportement potentiel de l'incendie. La version actuelle remonte à 1984 (Van Wagner, 1987; Van Wagner et Pickett, 1985) et elle intègre les meilleures caractéristiques des méthodes antérieures d'évaluation ainsi que des éléments nouveaux, qui se sont révélés nécessaires. La Méthode de l'Indice Forêt-Météo représentait un net progrès dans la longue quête ininterrompue de la recherche sur l'évaluation des dangers d'incendie au Canada.

Le deuxième grand volet a été conçu, selon la voie d'approche modulaire d'origine, comme une série de guides, élaborés à l'échelon régional, sur les caractéristiques réelles, plutôt que relatives, du comportement de l'incendie dans certains types précis de combustibles d'importance locale. Ces *indices de combustion* (Kiil, 1971; Lawson, 1972; Van Wagner, 1974a) ou *indices de comportement de l'incendie* (Lawson, 1977; Stocks, 1977; Quintilio, 1978) ont été élaborés au cours des années 70 et ils ont pris la forme de suppléments régionaux à la Méthode de l'IFM. Ces suppléments, couplés à la méthode de l'IFM, constituaient la première méthode vraiment nationale d'évaluation des dangers d'incendie au Canada.

Un document de travail décrivant la voie d'approche révisée en vue d'un plan national de prédiction des caractéristiques du comportement de l'incendie en présence de complexes précis de combustibles a été distribué au début des années 80 (C.E. Van Wagner et collab., 1982, inédit). La méthode que ce document présentait a pris le nom de Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt (PCI), en 1984, lorsque sa version provisoire a été publiée pour la première fois pour des essais sur le terrain et pour connaître la réaction des utilisateurs (Lawson et collab., 1985). On n'y trouvait la vitesse de propagation de l'incendie que dans 14 types principaux de combustibles canadiens. Sa diffusion visait à faire profiter les organismes de lutte contre les incendies des renseignements que renfermait la version provisoire sans autre retard, pendant que la recherche se poursuivait sur les volets qui restaient. La version actuelle intègre davantage de types de combustibles ainsi que des estimations de la consumation des combustibles et de l'intensité des incendies et elle fournit des modèles complets des feux de cimes et de la croissance de l'incendie.

L'objet du présent document est d'étayer scientifiquement la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt. Même s'il ne contient aucun programme informatique, il comprend la liste des équations utilisées (annexe I) ainsi que celle des symboles (annexe II). On peut obtenir, sur demande, un programme ordinaire en FORTRAN pour cette méthode, programme qui sera conservé et actualisé par l'Institut forestier national de Petawawa, à Chalk River (Ontario). Le programme comprend des exemples d'entrée-sortie pour servir d'étalons aux programmes de conception indépendante. Il revient au secteur privé ou aux organismes utilisateurs de créer les programmes opérationnels dont les usagers ont besoin pour mettre à profit la Méthode PCI.

Sur le plan de la doctrine, cette méthode est dans la droite ligne de la vieille approche de Forêts Canada à l'égard de la recherche sur le comportement des incendies, telle que l'a décrite Van Wagner en 1971. Cette approche repose sur les observations de terrain, la documentation des variables faciles à mesurer d'incendies expérimentaux dans des peuplements forestiers ainsi que dans des rémanents de la coupe à blanc, puis sur l'analyse des données à l'aide de techniques de corrélation et de modèles mathématiques simples. On a également tiré parti des brûlages dirigés et des feux échappés bien documentés, ces derniers ayant été particulièrement utiles pour la description des cas extrêmes de comportement, où les incendies expérimentaux sont difficiles à planifier et à maîtriser. La recherche de laboratoire sur la physique de l'humidité et sur la théorie de la propagation de la chaleur fournit les modèles et le cadre dans lequel les données de terrain sont analysées et expliquées.

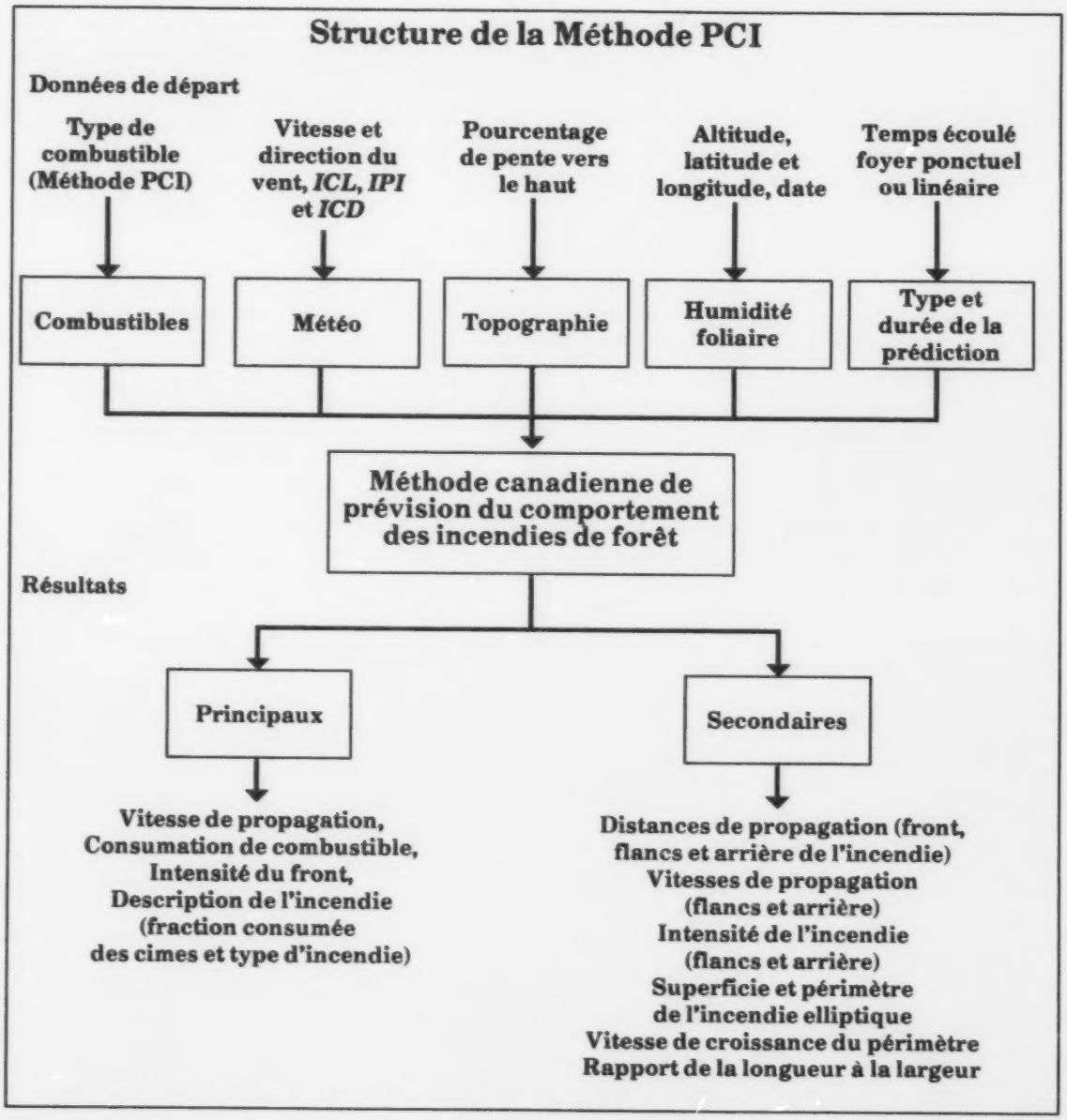


Figure 1. Structure de la Méthode de prévision du comportement des incendies de forêt.

2.0 Structure de la Méthode PCI

La Méthode PCI décrit les quatre composantes principales du comportement de l'incendie : vitesse de propagation, consumation des combustibles, intensité de l'incendie sous le vent et description de l'incendie (de surface ou de cimes) (figure 1). Secondairement, elle donne la distance de propagation du front, l'aire et le périmètre de l'incendie elliptique ainsi que l'intensité de l'incendie sur ses flancs et son arrière.

Tout au long du présent document, surtout au début de chaque section, des organigrammes montrent, à différents degrés de précision, le progrès logique vers les produits finals. Les organigrammes placés près du début des principales sections (composantes principales et secondaires) montrent la

Tableau 1. Ventilation de la base de données de la Méthode PCI

Type de combustible	Nombre d'incendies dans la base de données			Nombre d'incendies analysés	
	Expérimentaux	Échappés ou dirigés	Total	Vitesse de propagation	Consumation de combustible
C-1	7	1	8	8	7
C-2	18	30	48	48	13
C-3	41	22	63	63	41
C-4	15	20	35	35	15
C-5	19	1	20	20	10
C-6	12	0	12	12	11
C-7	8	5	13	13	3
M-1[a]	–	–	–	–	–
M-2[a]	–	–	–	–	–
M-3	5	0	5	5	5
M-4	1	0	1	1	1
D-1	32	3	35	35	26
S-1	48	11	59	53	56
S-2	49	21	70	52	68
S-3	28	5	33	16	33
O-1a[b]	52	6	58	58	–
O-1b[b]	74	–	74	74	–
Total[c]	**415**	**119**	**534**	**493**	**289**

[a] Les combustibles M-1 et M-2 sont tirés des modèles des combustibles C-2 et D-1 et non de données indépendantes.
[b] Les données sur le combustible O-1 proviennent de feux d'herbages en Australie.
[c] Même si le nombre d'observations originales n'est que de 495, certaines observations s'appliquent à plus d'un type de combustible, ce qui explique l'excédent de 39 incendies dans le total.

structure générale de la Méthode, tandis que les organigrammes des sous-sections entrent dans le détail des procédures. Les organigrammes sont conçus comme autant de points de repère qui permettront au lecteur de se situer dans l'ensemble de la Méthode.

Les données d'entrée se répartissent entre trois grands groupes de variables qui influent sur le comportement de l'incendie : le combustible, la météorologie et la topographie. D'autres données telles que la latitude et la longitude, la saison (date) et le temps écoulé (depuis l'allumage) servent à estimer l'évolution de l'incendie ou la distance de sa propagation. La Méthode PCI permet désormais de prédire :

- l'effet de la composition variable du combustible sur la vitesse de propagation;
- la consumation des combustibles, qui permet de calculer l'intensité;
- le début de l'embrasement des cimes;
- le passage de l'incendie de surface au feu de cimes;
- le comportement du feu de cimes.

Même si la forme des équations de la vitesse de propagation pour toute la gamme des comportements de l'incendie ne diffère pas de la forme des équations de la version provisoire, la méthode élargie autorise des écarts dans l'équation de la vitesse de propagation ainsi que dans l'estimation du degré d'embrasement des cimes. Des données supplémentaires de départ sont exigées pour ces améliorations; par exemple, l'indice du combustible disponible (ICD) de l'IFM sert d'indicateur de la masse de combustible disponible pour modifier la vitesse de propagation et prédire la consumation du combustible de surface. Comme l'humidité du feuillage est posée comme influant beaucoup sur le début de propagation de l'incendie aux cimes et sur la vitesse de propagation du feu de cimes, on a élaboré une méthode d'estimation de l'humidité foliaire à partir de données simples telles que la date, l'emplacement géographique et l'altitude.

Les résultats des calculs relatifs à la propagation sont la vitesse de propagation du front de l'incendie, quelle que soit la nature du terrain, dans les conditions à l'équilibre. En définissant la vitesse de

propagation comme l'avance du front par unité de temps après l'atteinte de l'équilibre, il est tenu implicitement compte de l'influence de la propagation par les cimes et par flammèches sur la vitesse générale de propagation. La période d'accélération de la propagation, à partir du foyer d'allumage jusqu'à l'atteinte de la vitesse à l'équilibre, est prise en considération de façon distincte dans le modèle de croissance de l'incendie elliptique, dans la section des composantes secondaires. Ni la facilité d'allumage ni la distance de propagation par flammèches n'entre dans la prévision du comportement, pour le moment, même si les conditions minimales d'une propagation constante minimale peuvent être déduites des équations de la vitesse de propagation.

Le volet consumation des combustibles permet de prédire la quantité de couverture morte, de combustibles ligneux au sol et de feuillage des cimes qui sera consumée. Cette consumation dépend de la siccité du combustible et du degré prévu de propagation par les cimes. Pour tous les types de combustible sauf les herbes, on pose par hypothèse une quantité normale de combustible. On pose également que la consumation a lieu entièrement sur le front de l'incendie, même si l'on sait que, derrière, la combustion se poursuit en couvant. On simplifie de même le feu de cimes en posant que seul le feuillage contribue à l'intensité du front, même si l'on sait que dans les feux de cimes intenses, les ramilles également sont brûlées dans le front actif de l'incendie. Grâce à ces simplifications, on peut appliquer à la Méthode PCI le principe d'intensité de Byram, qui décrit le dégagement d'énergie par unité de longueur du front dans le calcul de de cette composante.

3.0 Base de données de la Méthode PCI

Les principales équations de la vitesse de propagation de même que les équations préliminaires de la consumation, dans la plupart des types de combustible prévus par la Méthode PCI, ont été élaborées à partir d'un vaste corpus de données sur le comportement de l'incendie. Ce corpus a été constitué et est documenté à partir d'incendies expérimentaux qu'ont effectués les chercheurs de Forêts Canada en collaboration avec les organismes canadiens de lutte contre les incendies et il a été complété par les données d'observations de brûlages dirigés et de vastes incendies de forêt. Le corpus renferme actuellement des observations sur plus de 300 incendies au Canada et de certains autres qui se sont déclarés aux États-Unis près de la frontière. Le tableau 1 ventile les données du corpus selon le type de combustible.

Tableau 2. Types de combustibles selon la Méthode PCI

Groupe et code	Nom descriptif
Conifères	
C-1	Pessière à lichens
C-2	Pessière boréale
C-3	Pins gris ou pins tordus à maturité
C-4	Jeunes pins gris ou pins tordus
C-5	Pins rouges et pins blancs
C-6	Plantation de conifères
C-7	Pins ponderosas et douglas taxifoliés
Feuillus	
D-1	Peupliers faux-trembles sans feuilles
Forêts mixtes	
M-1	Forêt boréale mixte sans feuilles
M-2	Forêt boréale mixte avec feuilles
M-3	Forêt mixte à sapins baumiers morts, sans feuilles
M-4	Forêt mixte à sapins baumiers morts, avec feuilles
Rémanents	
S-1	Rémanents de pins gris ou de pins tordus
S-2	Rémanents d'épinettes blanches et de sapins baumiers
S-3	Rémanents de thuyas, de pruches et de douglas côtiers
Secteurs ouverts	
O-1	Herbes

4.0 Description des types de combustible

Le type de combustible a été défini comme une association identifiable d'éléments combustibles qui, en raison de l'essence, de la forme, de la taille, de la disposition et de la continuité, brûle d'une façon caractéristique dans des conditions données de combustion (Merrill et Alexander, 1987). Plus précisément, un type de combustible est un complexe de combustibles d'une homogénéité suffisante et occupant une superficie suffisante pour que le comportement de l'incendie à l'équilibre puisse se maintenir au cours d'une période considérable de temps.

La Méthode PCI organise les combustibles en 5 grands groupes qui totalisent 16 types (tableau 2). Il faut choisir le combustible qui convient le mieux à la situation. Cette liste représente toute la gamme des combustibles trouvés au Canada selon le corpus actuel

de données sur le comportement des incendies. Certains combustibles pour lesquels on ne possède pas de données fiables sur le comportement des incendies au Canada ont été englobés à cause de leur importance dans le paysage canadien (par exemple les forêts boréales mixtes et les herbes). La liste est perfectible; des additions et des précisions seront apportées à mesure que les données seront disponibles.

Dans la Méthode PCI, tous les types sont décrits qualitativement plutôt que quantitativement, selon la structure et la composition des peuplements, le combustible de surface et le combustible étagé ainsi que la couverture morte et la couche organique (humus). Les principales caractéristiques de chaque type sont résumées au tableau 3 et sont développées ci-dessous; à partir de ces descriptions, on pourra classer les combustibles à partir des descriptions dans les inventaires forestiers. Les descriptions intégrées à la Méthode PCI ne correspondent pas rigoureusement ni quantitativement aux classes utilisées dans les inventaires forestiers; toutefois, les responsables compétents de la lutte contre les incendies élaboreront des moyens de classer les données relatives au territoire et à la végétation qui relèvent d'eux pour planifier l'intervention (par exemple, De Groot, 1988). On pourra ainsi également affecter des données sur des incendies éventuels ou réels à un combustible convenable décrit dans la Méthode PCI.

4.1 Terminologie des types de combustibles

La classification du tableau 3 et les descriptions détaillées des types de combustibles de la section 4.2 se rapportent à la couverture du sol forestier et à la couche organique, aux combustibles de surface et aux combustibles étagés ainsi qu'à la structure et à la composition des peuplements. Les précisions terminologiques ci-dessous devraient aider à s'y retrouver dans la classification des combustibles.

Couverture du sol forestier et couche organique. La description de la couverture du sol forestier repose sur la composition du combustible qui propage l'incendie (litière d'aiguilles, d'herbes mortes, lichens, hypnacées) ainsi que sur la répartition de ce combustible (clairsemé, épars, discontinu ou continu). Les couches organiques (humus) sont décrites selon leur profondeur (minces [de 0 à 5 cm], modérément minces [de 5 à 10 cm], modérément profondes [de 10 à 20 cm] et profondes [plus de 20 cm]) ainsi que selon leur compacité relative (non compactes, modérément compactes et compactes).

Combustibles en surface et combustibles étagés. Ces combustibles consistent en éléments posés sur la litière. La couverture herbacée, si elle est notable, est décrite selon la composition de ses espèces et sa répartition ou couverture (clairsemée ou éparse, modérée ou dense/continue); la couverture arbustive, par la composition des espèces, la classe de hauteur (basse, moyenne, haute) et la densité, comme pour la végétation herbacée; le sous-étage conifèrien, par la composition des espèces, sa hauteur relative à la cime des arbres vivants et sa distribution (absente, clairsemée ou éparse, modérée, dense). Les autres combustibles étagés sont décrits s'ils sont notables ou absents (cimes descendant jusqu'au sol ou largement séparées du sol, écorce écailleuse).

Les combustibles ligneux jonchant le sol des peuplements forestiers et les types de combustibles fournis par les rémanents de la coupe sont décrits selon leur répartition et leur quantité. Dans le cas des rémanents, on précise l'épaisseur de leur couverture et le taux de rétention du feuillage. Les combustibles ligneux au sol peuvent être clairsemés ou dispersés, présents en quantités faibles à modérées ou être continus ou denses. Les rémanents peuvent être discontinus (brisés par le passage des débusqueuses) ou continus, représenter une quantité faible, modérée ou forte et être minces (<0,5 m), modérés (0,5 à 1,0 m) ou profonds (>1,0 m). La rétention du feuillage des rémanents peut être faible (<20 %), modérée (de 20 à 50 %) ou élevée (>50 %).

Structure et composition du peuplement. Sur le plan de la densité de l'étage dominant (fermeture du couvert), le peuplement est décrit comme suit : ouvert (fermeture incomplète du couvert, même si l'étage dominant peut être fortement réuni en bouquets), modéré (fermeture du couvert incomplète ou variable selon la saison); complet (fermeture complète du couvert) ou dense. D'autres caractéristiques de la structure des peuplements qui sont importantes pour la propagation de l'incendie et l'embrasement des cimes peuvent être classées : essences de l'étage dominant, hauteur du peuplement, hauteur jusqu'à la cime vivante, longueur de la cime vivante ou rapport cime/hauteur totale, maturité du peuplement, continuité horizontale et verticale du combustible.

4.2 Descriptions détaillées des types de combustibles selon la Méthode PCI

4.2.1 Groupe des conifères

Type C-1 (pessière à lichens). Ce type de combustible se caractérise par les peuplements d'épinettes

noires (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.), ouverts, ressemblant à une forêt-parc, qui occupent les hauteurs bien drainées de la zone subarctique de l'ouest et du nord du Canada. L'étage dominant compte également, comme essences associées, un peu de pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) et de bouleaux à papier (*Betula papyrifera* Marsh.). Le couvert forestier se présente sous la forme d'arbres largement espacés et de bouquets denses. La hauteur des arbres varie considérablement, mais les branches du fût (vivantes et mortes) s'étendent uniformément jusqu'au sol forestier, et le marcottage est répandu. L'accumulation de combustible ligneux à la surface est très faible et elle est dispersée. La couverture arbustive est excessivement clairsemée. La surface du sol est totalement exposée au soleil et couverte par un enchevêtrement presque continu de cladonies, dont l'épaisseur moyenne au-dessus du sol minéral est de 3 à 4 cm.

Type C-2 (pessière boréale). Ce type de combustible se caractérise par des peuplements d'épinettes noires de densité relative modérée, purs, occupant les basses terres (à l'exclusion des tourbières à sphaignes) et les hauteurs. La base des cimes effleure le sol, et les branches mortes sont ordinairement enveloppées de lichens barbus (usnées). L'écorce du bas des fûts est fortement écailleuse. La matière ligneuse au sol est présente en volumes faibles à modérés. Le thé du Labrador (*Ledum groenlandicum* Oeder) est souvent la principale espèce arbustive. Le sol de la forêt est dominé par un tapis de mousses hypnacées, de lichens (principalement des cladonies) ou des deux. Les sphaignes peuvent parfois être présentes, mais elles empêchent peu la propagation du feu en surface. La profondeur de la couche organique compacte dépasse souvent 20 à 30 cm.

Type C-3 (pins gris ou pins tordus à maturité). Ce type de combustible se caractérise par des peuplements purs, de densité relative adéquate (1000 à 2000 tiges/ha) de pins gris ou de pins tordus (*P. contorta* Dougl.), qui ont atteint le stade de la fermeture complète du couvert. La base de la cime vivante est bien éloignée du sol. Les combustibles morts de surface sont légers et dispersés. La couverture du sol est constituée d'hypnacées sur une couche organique compacte, modérément profonde (environ 10 cm). Un sous-étage clairsemé de conifères peut être présent.

Type C-4 (jeunes pins gris ou pins tordus). Ce type de combustible se caractérise par des peuplements purs de pins gris ou de pins tordus, de densité relative élevée (10 000 à 30 000 tiges/ha) dans lesquels la mortalité due à l'éclaircie naturelle se traduit par la présence d'un grand nombre de tiges mortes encore debout ou de combustible ligneux mort au sol. La continuité verticale et horizontale du combustible caractérise ce type. La quantité de combustible en surface est supérieure à celle que l'on observe dans le type C-3, et les couches organiques sont moins profondes et moins compactes. La couverture du sol est surtout constituée d'une litière d'aiguilles, en suspension dans une strate arbustive basse (*Vaccinium* sp.).

Type C-5 (pins rouges et pins blancs). Ce type se caractérise par des peuplements de pins rouges (*P. resinosa* Ait.) et de pins blancs (*P. strobus* L.) en diverses proportions, mûrs, comprenant parfois un peu d'épinettes blanches (*Picea glauca* [Moench] Voss) et de vieux bouleaux à papier ou peupliers faux-trembles (*Populus* sp.). Le sous-étage, de densité moyenne, est habituellement constitué d'érables rouges (*Acer rubrum* L.) ou de sapins baumiers (*Abies balsamea* [L.] Mill.). Une strate arbustive, habituellement de noisetiers à long bec (*Corylus cornuta* Marsh.), peut être présente en proportions modérées. La couverture du sol est une combinaison d'herbes et d'une litière d'aiguilles de pins. La couche organique a habituellement de 5 à 10 cm de profondeur.

Type C-6 (plantation de conifères). Ce type est caractérisé par les plantations pures de conifères, de densité relative adéquate, à couvert fermé, sans sous-étage ni strate arbustive. Le sol est couvert d'une litière d'aiguilles au-dessus d'une couche d'humus qui atteint jusqu'à 10 cm de profondeur. Les relations établies entre la vitesse de propagation et les feux de cimes tiennent compte de la hauteur de la base de la cime.

Type C-7 (pins ponderosas et douglas taxifoliés). Ce type de combustible est caractérisé par des peuplements inéquiennes de pins ponderosas (*Pinus ponderosa* Laws.) et de douglas taxifoliés (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) en diverses proportions. Le mélèze occidental (*Larix occidentalis* Nutt.) et le pin tordu peuvent constituer une proportion considérable du peuplement dans certaines stations et à certaines altitudes. Les peuplements sont ouverts, étant parsemés de bouquets de douglas taxifoliés et/ou de mélèzes d'âges divers, qui forment un sous-étage discontinu. La fermeture du couvert est dans l'ensemble inférieure à 50 %, même si les bouquets d'arbres forment un couvert fermé et souvent dense. L'accumulation de combustible ligneux en surface est légère et dispersée. Sauf dans les bouquets de douglas, le sol forestier est dominé par les herbes, les graminées vivaces ainsi que les arbustes dispersés. Dans les bouquets d'arbres, la

Table 3. Caractéristiques des types de combustibles dans la Méthode PCI

Sol forestier et couche organique	Combustible de surface et combustible étagé	Structure et composition du peuplement
Type de combustible C-1 (pessière à lichens)		
Tapis continu de lichens (cladonie des rennes); couche organique absente ou peu profonde, non tassée.	Couverture très clairsemée d'herbes ou d'arbrisseaux ainsi que de combustible ligneux au sol; cimes descendant jusqu'au niveau du sol.	Peuplement lacuneux d'épinettes noires avec bouquets denses; associé au pin gris, au bouleau à papier; sur les hauteurs bien drainées.
Type de combustible C-2 (pessière boréale)		
Couverture continue d'hypnacées ou de cladonies; couche organique profonde et compacte.	Fruticée ininterrompue (p. ex. thé du Labrador); quantité faible à modérée de combustibles ligneux au sol; cimes descendant presque au niveau du sol; lichens arboricoles, écorce écailleuse.	Peuplement d'épinettes noires de densité relative modérée dans des stations élevées et basses; tourbières à sphaignes exclues.
Type de combustible C-3 (pins gris ou pins tordus à maturité)		
Couverture continue d'hypnacées; couche organique modérément profonde, compacte.	Sous-étage clairsemé de conifères pouvant être présent; combustibles ligneux au sol clairsemé; cimes ne touchant pas le sol.	Peuplements mûrs de pins gris ou de pins tordus de densité relative adéquate.
Type de combustible C-4 (jeunes pins gris ou pins tordus)		
Litière continue d'aiguilles; couche organique modérément compacte.	Couverture arbustive et herbacée modérée; continuité complète du combustible vertical des cimes; beaucoup de combustible ligneux mort, encore debout et au sol.	Jeunes peuplements denses de pins gris ou de pins tordus.
Type de combustible C-5 (pins rouges et pins blancs)		
Litière continue d'aiguilles; couche organique modérément mince.	Couverture arbustive et herbacée modérée (p. ex. noisetiers); sous-étage modérément dense (p. ex. érable rouge, sapin baumier); cimes séparées du sol.	Peuplement de pins rouges et de pins blancs, de densité relative modérée; associé à l'épinette blanche, au bouleau à papier et au peuplier faux-tremble.
Type de combustible C-6 (plantation de conifères)		
Litière continue d'aiguilles; couche organique modérément mince.	Couverture arbustive ou herbacée absente; sous-étage absent; cimes séparées du sol.	Plantation de conifères de densité relative adéquate; fermeture complète du couvert, quelle que soit la hauteur moyenne du peuplement; la hauteur moyenne de la base de la couronne commande la vitesse de propagation et l'embrasement des cimes.
Type de combustible C-7 (pins ponderosas et douglas taxifoliés)		
Litière continue d'aiguilles; couche organique absente à mince.	Couverture d'herbes ou de graminées sauf dans les bouquets de résineux; combustibles ligneux légers; cimes séparées du sol, sauf dans les bouquets d'arbres.	Peuplement lacuneux de pins ponderosas et de douglas taxifoliés; inéquienne, à maturité; associé au mélèze occidental, au pin tordu; sous-étage de bouquets de conifères.
Type de combustible D-1 (peupliers faux-trembles sans feuilles)		
Litière continue de feuilles; couche organique non tassée.	Strate modérément dense d'herbes et d'arbustes moyens à hauts; sous-étage de conifères absent; combustible ligneux au sol mort, clairsemé.	Peuplement semi-mûr de peupliers faux-trembles de densité relative modérée; absence de feuilles (c'est-à-dire au printemps, à l'automne ou du fait de la maladie).

Table 3. Caractéristiques des types de combustibles dans la Méthode PCI (suite et fin)

Sol forestier et couche organique	Combustible de surface et combustible étagé	Structure et composition du peuplement
Type de combustible M-1 et M-2 (forêt boréale mixte, avec et sans feuilles)		
Litière continue de feuilles dans les parties du peuplement occupées par les feuillus; litière discontinue d'hypnacées et d'aiguilles dans les parties occupées par les conifères; couches organiques minces, non à modérément compactes.	Strate modérément dense d'arbustes et d'herbes continues; combustible ligneux mort au sol, en quantité faible à modérée; cimes des conifères atteignant presque le sol; sous-étage de conifères dispersé à modéré.	Peuplement mélangé de densité relative modérée de conifères boréaux (p. ex. épinette noire ou blanche, sapin baumier ou subalpin) et de feuillus (p. ex. peuplier faux-tremble, bouleau à papier). Les types de combustibles se distinguent selon la saison et le pourcentage de conifères ou de feuillus entrant dans leur composition.
Type de combustible M-3 et M-4 (forêt mixte à sapins baumiers morts, avec et sans feuilles)		
Litière continue de feuilles dans les parties du peuplement occupées par les feuillus; couche discontinue d'hypnacées, de litière d'aiguilles et de feuilles dans les parties mixtes du peuplement; couches organiques modérément compactes, de 8 à 10 cm.	Couverture dense et continue d'herbacées après le débourrement; au début, peu de combustible ligneux, mais la quantité devient importante après plusieurs années, après la mortalité des sapins baumiers; combustibles étagés dominés par un sous-étage de sapins baumiers morts.	Peuplement mélangé, de densité relative modérée, d'épinettes, de pins et de bouleaux comportant des sapins baumiers morts, souvent en sous-étage. Les types de combustibles se distinguent selon la saison et le nombre d'années depuis la mort des baumiers.
Type de combustible S-1 (rémanents de pins gris ou de pins tordus)		
Couverture continue d'hypnacées; litière discontinue d'aiguilles; couche organique compacte, modérément profonde.	Couche continue de rémanents, en quantité et profondeur modérées; strate arbustive et herbacée absente à clairsemée.	Rémanents de la coupe à blanc; peuplement mûr de pins gris ou de pins tordus.
Type de combustible S-2 (rémanents d'épinettes blanches et de sapins baumiers)		
Couverture continue d'hypnacées et de litière d'aiguilles; couche organique modérément profonde, compacte.	Couverture continue à discontinue de rémanents (en raison des pistes de débusquage); rétention modérée du feuillage; quantité et profondeur modérées; couverture arbustive et herbacée modérée.	Rémanents de la coupe à blanc; peuplement mûr ou suranné d'épinettes blanches, de sapins subalpins ou de sapins baumiers.
Type de combustible S-3 (rémanents de thuyas, de pruches et de douglas côtiers)		
Couverture continue d'hypnacées ou litière compacte de vieilles aiguilles sous une litière neuve d'aiguilles laissées par les rémanents; couche organique modérément profonde à profonde, compacte.	Couche continue de rémanents, forte rétention du feuillage (thuya), modérée dans le cas des autres essences; grande quantité de rémanents en couche profonde; couverture arbustive et herbacée clairsemée à modérée.	Rémanents de la coupe à blanc, peuplement mûr à suranné de thuyas, de pruches ou de douglas.
Type de combustible O-1 (herbes)		
Litière continue d'herbes mortes; couche organique absente à mince et modérément compacte.	Herbes sur pied formant une strate continue (pousse de l'année). Quantité régulière de 0,3 kg/m^2, mais une autre valeur est possible; il faut estimer le pourcentage de matière fanée ou morte. Arbustes et combustibles ligneux au sol clairsemés ou épars. Les sous-types constitués de l'enchevêtrement d'herbes du début du printemps et d'herbes fanées sur pied de la fin de l'été sont inclus dans la présente catégorie.	Si des arbres épars sont présents, ils n'influent pas de façon marquée sur le comportement de l'incendie.

litière d'aiguilles est le principal combustible de surface. L'épaisseur de l'humus est nulle à faible (<3 cm).

4.2.2 Groupe des feuillus

Type D-1 (peupliers faux-trembles sans feuilles). Ce type se caractérise par des peuplements purs de peupliers faux-trembles (*Populus tremuloides* Michx.), semi-mûrs, avant le débourrement printanier ou après la chute automnale des feuilles et le fanage de la végétation inférieure à l'automne. Le sous-étage conifèrien brille par son absence, mais une strate bien développée d'arbustes de hauteur moyenne à élevée est typiquement présente. Le combustible constitué de bois ronds morts jonchant le sol est un élément mineur du complexe des combustibles. Le principal combustible de surface est surtout la litière des feuilles ainsi que les herbes fanées, qui sont directement exposées au vent et au soleil. Au printemps, la couche d'humus (horizons F et H) contribue rarement aux combustibles disponibles en raison de sa forte humidité.

4.2.3 Groupe des forêts mixtes

Types M-1 (forêt boréale mixte, sans feuilles) et M-2 (forêt boréale mixte, avec feuilles). Ces types de combustibles sont caractérisés par des mélanges de peuplements constitués des conifères et des feuillus suivants, en proportions diverses : épinette noire, épinette blanche, sapin baumier, sapin subalpin (*Abies lasiocarpa* [Hook.] Nutt.), peuplier faux-tremble et bouleau à papier. En une station donnée, certaines de ces essences peuvent être absentes. Outre la diversité des essences, les peuplements possèdent une structure et un développement très variables, mais ils sont en général confinés aux hauteurs modérément bien drainées. Deux phases, reliées aux variations saisonnières de l'inflammabilité de ces forêts sont distinguées : le stade sans feuilles, qui se présente le printemps et l'automne (combustible de type M-1) et le stade avec feuilles (type M-2). La vitesse de propagation de l'incendie dans ces deux types de combustibles est pondérée par le pourcentage respectif de résineux et de feuillus. L'été, lorsque l'étage dominant et le sous-étage sont en feuilles, la propagation du feu est considérablement réduite, n'étant, au plus, que le cinquième de celle que l'on observe le printemps et l'automne dans des conditions par ailleurs semblables.

Types M-3 (forêt mixte à sapins baumiers morts, sans feuilles) et M-4 (forêt mixte à sapins baumiers morts, avec feuilles). Ces types de combustibles se caractérisent par les peuplements mixtes où croît le sapin baumier, souvent dans le sous-étage, en mélange hétérogène avec l'épinette, le pin et le bouleau. Ces peuplements s'observent dans les régions forestières des Grands Lacs et du Saint-Laurent ainsi que dans les régions boréales du Canada, et elles ne doivent pas être confondues avec les peuplements purs de sapins baumiers qui sont typiques de la Nouvelle-Écosse et du Nouveau-Brunswick. Les défoliations annuelles répétées (dues aux attaques de la tordeuse des bourgeons de l'épinette) tuent les sapins baumiers : l'écorce se pèle, les branches se drapent de lichens (mousse espagnole ou barbe de capucin, usnées), les cimes se brisent et les tiges évoluent en chablis, phénomènes culminant cinq à huit années après la mortalité. Le volume de matières ligneuses au sol est d'abord petit, mais il augmente considérablement avec la décomposition du peuplement consécutive à la mortalité. Le sol forestier est constitué d'un mélange d'hypnacées, d'aiguilles et de feuilles. La couche organique est modérément compacte et sa profondeur varie de 8 à 10 cm.

Après la mortalité, les incendies printaniers dans ce type de combustible se montrent extrêmement ardents, se propageant de façon continue par les cimes et à la faveur des flammèches transportées par le vent, tandis que les incendies d'été sont gênés par la luxuriance de la végétation verte du sous-étage favorisée par l'ouverture du couvert. Quand une quantité suffisante de combustible de surface s'est accumulée à la faveur de la décomposition du peuplement (habituellement après quatre ou cinq ans) au cours de l'été, les incendies se propageront dans le complexe de combustibles, mais pas aussi vigoureusement qu'au printemps. La possibilité d'incendie est maximale de cinq à huit ans après la mortalité, puis elle diminue graduellement avec la décomposition des combustibles de surface et la luxuriance croissante de la végétation du sous-étage.

4.2.4 Groupe des rémanents

Type S-1 (rémanents de pins gris ou de pins tordus). Ce type de combustible se caractérise par les rémanents provenant de la coupe à blanc réalisée à l'aide de tracteurs ou de débardeurs, dans les peuplements mûrs de pins gris ou de pins tordus. Les rémanents remontent ordinairement à une ou deux campagnes et ils conservent jusqu'à la moitié du feuillage, particulièrement les branches les plus rapprochées du sol. Aucun traitement n'a été appliqué après la coupe, et les combustibles forment une couche continue sur le sol. Les cimes et les branches abandonnées sur place font que la quantité

et la profondeur du combustible sont modérées. La couverture au sol est constituée d'une strate continue d'hypnacées parsemée d'une litière discontinue d'aiguilles tombées. Les couches organiques sont modérément profondes et assez compactes.

Type S-2 (rémanents d'épinettes blanches et de sapins baumiers). Ce type de combustible se caractérise par les rémanents de la coupe à blanc réalisée à l'aide de tracteurs ou de débardeurs dans les peuplements mûrs à surannés d'épinettes blanches et de sapins subalpins ou de sapins baumiers. Les rémanents remontent habituellement à une ou deux campagnes et ils conservent de 10 à 50 % du feuillage sur les branches. Aucun traitement n'a été appliqué après la coupe. La continuité du combustible peut être interrompue par les pistes suivies par les débusqueuses, à moins que la coupe n'ait eu lieu en hiver. Des cimes ont été abandonnées sur place et la plupart des branches se sont brisées durant le débardage jusqu'aux dépôts, ce qui fait que la quantité et la profondeur du combustible sont modérées. Les gros morceaux de bois brisés et pourris peuvent abonder. La couverture du sol est constituée d'hypnacées et d'une litière considérable d'aiguilles tombées des rémanents. Les couches organiques sont modérément profondes et compactes.

Type S-3 (rémanents de thuyas, de pruches et de douglas côtiers). Ce type de combustible se caractérise par des rémanents provenant de la coupe à blanc réalisée dans des peuplements mixtes mûrs à surannés de conifères de la région côtière de la Colombie-Britannique. Les essences prédominantes sont le thuya géant (*Thuja plicata* Donn.), la pruche occidentale (*T. heterophylla* [Raf.] Sarg.) et le douglas taxifolié. Les rémanents remontent habituellement à la campagne précédente. Ceux du thuya conservent tout leur feuillage sur les branches, mais fané, tandis que les rémanents de pruche et de douglas ont perdu jusqu'à 50 % de leur feuillage. Le combustible tend à être continu et non compact. On observe parfois un très grand nombre de morceaux de bois brisés et pourris non commercialisables, selon le degré de décadence du peuplement. L'épaisseur du combustible peut aller de 0,5 à 2,0 m. La couverture du sol peut être constituée d'hypnacées ou uniquement d'une litière d'aiguilles compactes et vieilles en quantités importantes sous les aiguilles qui viennent de tomber des rémanents. Les couches organiques sont modérément profondes à profondes et elles sont compactes. Un sous-étage mineur à moyen d'arbustes et d'herbes peut être présent. Ce type de combustible peut également se retrouver dans les rémanents de thuyas et de pruches décadents de la zone humide des régions côtières et intérieures de la Colombie-Britannique dont est absent le douglas.

4.2.5 Secteurs ouverts

Type O-1 (herbes). Ce type de combustible se caractérise par une couverture herbacée continue, où l'on ne trouve pas plus que quelques arbres ou bouquets d'arbustes, sans influence notable sur le comportement de l'incendie. On distingue deux sous-types : l'enchevêtrement d'herbes aplaties, comme on en observe souvent après la fonte ou au printemps (O-1a); les herbes mortes sur pied, comme on en trouve souvent à la fin de l'été jusqu'au début de l'automne (O-1b). La proportion de matières mortes ou fanées dans les herbages influe beaucoup sur la propagation du feu et elle doit être estimée avec soin.

5.0 Modes de calcul de l'indice du combustible léger

Comme le montre la figure 1, les données de départ de la Méthode PCI qui découlent des conditions météorologiques comprennent la vitesse et la direction du vent ainsi que l'indice du combustible léger (ICL) de la Méthode de l'IFM. Les corrections prévues de l'ICL n'ont pas toutes été mises au point et elles ne sont pas non plus considérées comme faisant partie intégrante de la Méthode PCI. Les corrections de l'ICL finiront par s'intégrer au sous-système, partiellement mis au point, de l'humidité des combustibles accessoires de la MCEDIF (Stocks et collab., 1989).

Dans la version provisoire de la Méthode PCI (Lawson et collab., 1985), se trouvait un tableau permettant de corriger l'ICL standard pour les heures de l'après-midi et du début de la soirée et une table pour corriger l'ICL en fonction des écarts de la pente et de l'exposition entre les points d'observation météorologique et le point faisant l'objet de la prédiction du comportement de l'incendie. Ces tables sont des adaptations des résultats de recherches antérieures, mais elles étaient considérées comme provisoires pendant que se poursuivait la recherche sur un modèle mathématique complet de la correction de l'ICL en fonction de la latitude, de l'altitude, de la pente et de l'exposition ainsi que de l'heure de la journée. En outre, Van Wagner (1977a) a publié une méthode de calcul de l'ICL à des intervalles horaires.

La table provisoire simple de correction de l'ICL n'exigeait aucune observation météorologique supplémentaire pour les heures de l'après-midi et de la soirée. Elle reposait sur l'hypothèse d'une variation « normale » de la température et de l'humidité

relative dans l'après-midi et elle dérivait de versions déjà publiées (Van Wagner, 1972; Canadian Forestry Service, 1973, 1974; Alexander, 1982). Son domaine d'application se limitait aux heures de l'après-midi, dans un souci de simplification des données nécessaires et pour se limiter aux heures et aux intervalles de valeur de l'ICL normalement intéressants pour la prédiction du comportement des incendies. Les percées récentes dans les capacités de collecte et de transmission électronique des données météorologiques ont rendu possible le calcul horaire de l'ICL, ce qui a exigé à son tour l'actualisation de la méthode originale de Van Wagner. Le modèle de l'ICL horaire de 1977 est actuellement en révision.

La méthode actuelle de calcul de l'ICL horaire (Van Wagner, 1977a; Alexander et collab., 1984) part de mesures horaires de la température par le thermomètre sec, de l'humidité relative, de la vitesse du vent et de la hauteur totale de pluie tombée (au cours de l'heure). D'autres intervalles d'observations météorologiques et de calculs de l'ICL sont possibles. La méthode de calcul a été intégrée à des programmes informatiques qui peuvent être mis en branle et arrêtés à toute heure du jour et qui peuvent être exécutés avec la répétition, autant de fois que l'on veut, d'un cycle météorologique diurne, ou d'une série de cycles différents, avec des données météorologiques réelles ou prévues. Pour la prédiction du comportement des incendies, ceci rend la méthode de calcul horaire de l'ICL préférable à l'ICL normal, qui intègre une courbe normalisée diurne, et préférable, également, à la seule courbe diurne de la table de Van Wagner (1972). Cette méthode de calcul tient compte de cycles météorologiques diurnes et locaux qui peuvent s'écarter considérablement du cycle normal, selon la latitude, la saison, la topographie (effets orographiques et effets des vallées) ainsi que selon le milieu côtier. En raison des effets locaux, notamment de la latitude et de la saison, l'humidité du combustible léger peut toucher un minimum entre 18 et 20 h, ce qui est considérablement plus tard que le maximum thermique et le minimum de l'humidité relative, bien que la vitesse du vent ait généralement baissé considérablement par rapport à son summum de l'après-midi. Le summum traditionnel du risque d'incendie de 16 h reste donc une hypothèse raisonnable.

La figure 2 montre trois modes possibles du calcul opérationnel de l'ICL ainsi que de l'IPI (indice de propagation initiale), par la Méthode PCI. Pour le calcul de l'IPI, tous ces modes se fondent sur la vitesse réelle ou prévue du vent pour le moment et le secteur d'intérêt. Le premier mode permet d'utiliser l'ICL journalier normal ainsi que la vitesse actualisée du vent, dans l'après-midi, pour calculer l'IPI corrigé en fonction du vent. Le mode 2 permet d'élargir la période temporelle (de midi à 20 h), pour laquelle on peut calculer un ICL (et un IPI) corrigé, sans données météorologiques supplémentaires; toutefois la courbe météorologique diurne normalisée, posée par hypothèse, constitue une restriction. Le mode 3 donne l'ICL et l'IPI les plus représentatifs, mais il exige le plus de données météorologiques.

Dernière précision sur l'emploi des calculs horaires de l'ICL par la Méthode PCI : des écarts subsisteront entre l'ICL journalier normal (calculé à partir des observations météorologiques méridiennes, heure normale locale) et les valeurs de l'ICL du milieu de l'après-midi calculées à partir des données météorologiques horaires réelles au moyen du programme de calcul de l'ICL horaire (Van Wagner, 1977a; Alexander et collab., 1984). L'ICL horaire calculé devrait être considéré comme la valeur « réelle », dans ce cas, et il devrait être archivé à titre d'ICL de référence, à partir duquel on fonderait des analyses du comportement des incendies.

6.0 Humidité foliaire

L'humidité foliaire (*HF*) des aiguilles des conifères influe beaucoup sur deux caractéristiques du comportement des incendies dans les forêts de conifères : l'embrasement des cimes et la vitesse de propagation de l'incendie par les cimes (Van Wagner, 1977b). Pour tous les types de combustible (sauf ceux du type C-6, plantation de conifères), son effet sur la vitesse de propagation du feu dans les cimes n'est pas pris en considération en raison de la nature statistique des modèles. Toutefois, l'embrasement des cimes dans les plantations de conifères et la propagation de l'incendie dans les cimes exigent une estimation de *HF*. Ce paramètre varie de 85 à 120 %, selon la saison. Appelons « minimum printanier » la période où *HF* est relativement faible au printemps et au début de l'été. Ce minimum est surtout physiologique, du fait de l'augmentation temporaire de la masse sèche plutôt que d'une baisse réelle de la teneur en eau cellulaire (Little, 1970b; Gary, 1971). Pour des raisons pratiques, on pose comme hypothèse que la date de ce minimum est une constante régionale, d'une année à l'autre, et qu'elle ne subit pas l'influence des écarts annuels des conditions météorologiques. Une méthode a été conçue afin d'estimer *HF* à partir de données simples telles que la localité, l'altitude et la date. Toutes les équations sont données à la fin de la présente section.

À titre de données de terrain pour l'élaboration du processus, on disposait de neuf études canadiennes de l'humidité foliaire, dans des localités situées entre les

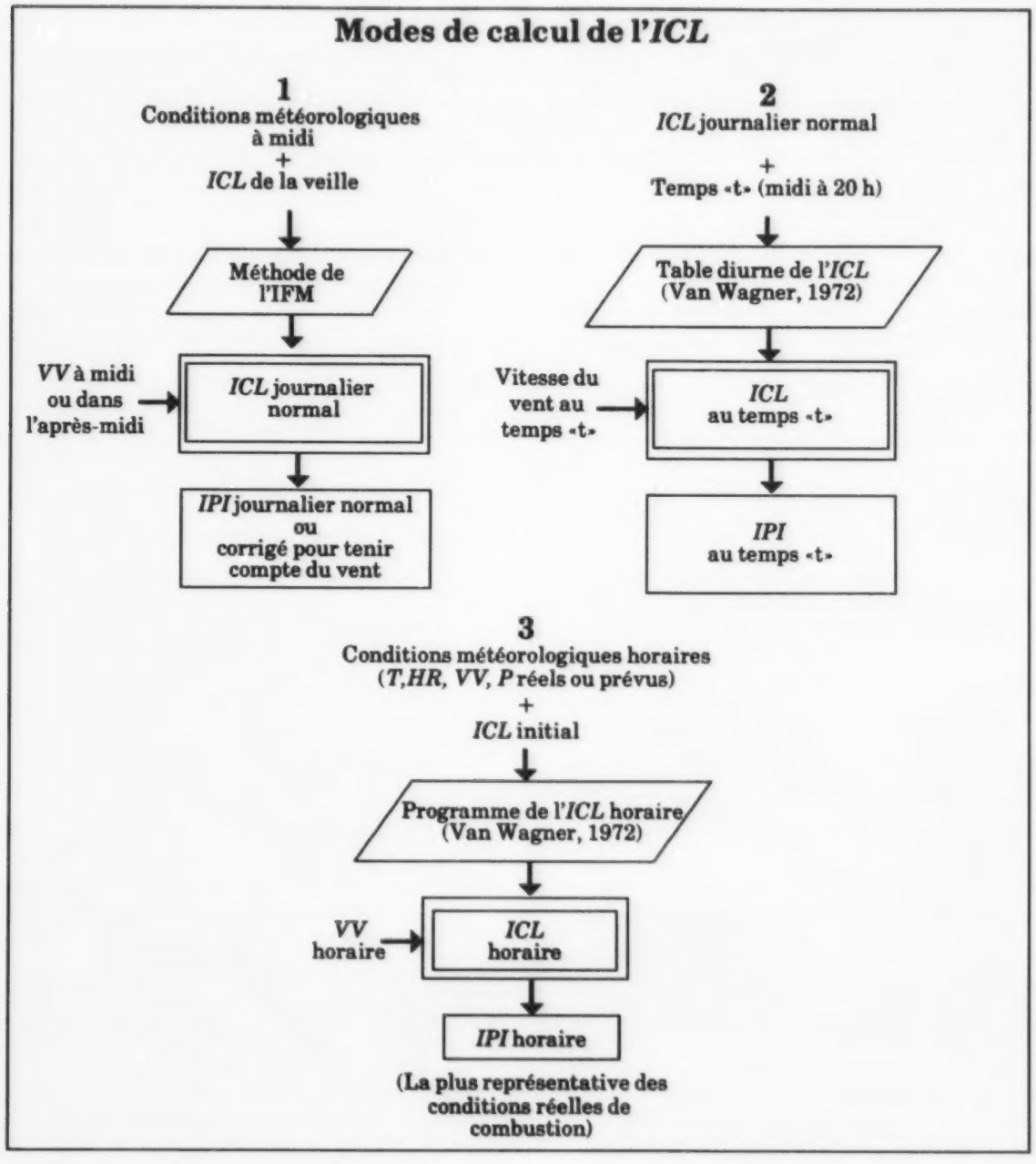


Figure 2. Les trois modes du calcul de l'indice du combustible léger (*ICL*) dans le sous-système Humidité des combustibles accessoires de la MCEDIF (*T* = température, *HR* = humidité relative, *P* = précipitation, *VV* = vitesse du vent, « t » = temps spécifique de la journée).

Tableau 4. Sources de données au Canada sur le minimum printanier de la teneur en humidité dans le feuillage des conifères

Localité	Lat. (°)	Long. (°)	Altitude (m NMM)	Référence	Nombre d'années de prélèvements
Fredericton	45,9	66,7	50	Little 1970a, 1970b; Données inédites[a]	4
Petawawa	46,0	77,4	150	Van Wagner, 1967	6
Kapuskasing	49,5	82,4	200	Springer & Van Wagner, 1984	
Lesser Slave Lake	55,2	114,5	580	Chrosciewicz, 1986	2
Big Fish Lake	59,2	116,0	850	Données inédites[b]	2
Victoria	48,5	123,8	100	Russell & Turner, 1975	1
Castlegar	49,2	117,9	610	Données inédites[c]	1
Swan Hills	54,5	115,5	1 005	Fuglem & Murphy, 1980	1
Foothills	53,0	117,0	1 065	Fuglem & Murphy, 1980	1

[a] Données archivées au Centre de foresterie des Maritimes de Forêts Canada.
[b] Données collectées par le Service canadien des forêts en 1984 et 1985, communiquées par M. E. Alexander.
[c] Données collectées par le collège de Selkirk en 1974 et communiquées par J.A. Turner.

Tableau 5. Teneur moyenne en humidité, au moment du minimum printanier, dans le vieux feuillage des conifères des six premières localités énumérées au tableau 4 et date moyenne où on observe ce minimum (D_0)

Localité	Teneur moyenne en humidité (%)			D_0 (numéro séquentiel dans l'année)[a]	Essences échantillonnées[b]
	Min.	Max.	Intervalle		
Fredericton	81	125	44	147	Sb
Petawawa	94	121	27	146	Pb, Pr, Pg, Éb, Sb
Kapuskasing	82	106	24	154	Én
Lesser Slave Lake	84	121	37	158	Pg, Én, Éb, Sb
Big Fish Lake	75	95	20	180	Én
Victoria	103	149	46	121	Dt, Po
Moyenne	**86,5**	**119,5**	**33,0**		

[a] Ainsi, le 1er juin est le 152e jour de l'année ordinaire.
[b] Dt : douglas taxifolié; Éb : épinette blanche; Én : épinette noire; Pb : pin blanc; Pg : pin gris; Po : pruche occidentale; Pr : pin rouge; Sb : sapin baumier.

longitudes de 67 à 124° ouest et entre les latitudes de 46 à 59° nord (tableau 4). Ces données montrent les tendances de *HF* dans le temps, à la lumière de prélèvements périodiques effectués, le printemps et l'été, sur une ou plusieurs essences conifériennes. Dans deux localités, Castlegar et Foothills (Alberta), les échantillons ont été prélevés à plusieurs altitudes.

La première étape du processus a été de construire une courbe normalisée pour représenter l'allure du minimum printanier. À cette fin, nous n'avons utilisé que les six premières sources de données énumérées au tableau 4, qui correspondent à des localités en terrain relativement plat. D'abord, nous avons lissé subjectivement, sur le graphique, les tendances de *HF* en fonction de la date, et nous avons estimé les dates marquant le début, le paroxysme et la fin du minimum printanier, de même que *HF* à chacune de ces dates. Lorsque plus d'une essence a été l'objet d'échantillonnages ou lorsque l'on disposait de plus d'une année de données, nous avons calculé la moyenne des résultats pour la localité (tableau 5). À partir des données, nous avons tracé la courbe normalisée du minimum printanier, symétrique de part et d'autre du minimum, étalée sur une période de 100 jours et allant de 85 à 120 % de *HF*. Cette courbe a été représentée algébriquement par deux paraboles,

une pour sa partie centrale et l'autre, inversée, pour ses branches symétriques.

La deuxième étape a été la conception d'une méthode de calcul de la date du minimum de *HF* dans toute localité, selon la latitude et la longitude. À la lumière de la nature générale des isothermes climatiques du Canada, il a été estimé comme probable que l'isoplèthe de toute valeur donnée de la date du minimum de *HF* dessinerait une courbe de pente décroissante à partir du Nord-Ouest canadien, qui deviendrait graduellement parallèle à la latitude dans l'Est. On a donc procédé comme suit :

(1) Les latitudes des six localités relativement sans relief ont été normalisées en étant ramenées au même D_0 (date du minimum de *HF*) en multipliant chaque latitude par le D_0 minimum et en la divisant par le D_0 spécifique.
(2) On a tracé le graphique des logarithmes naturels des latitudes normalisées (moins 46, valeur trouvée empiriquement comme étant la plus représentative de la latitude asymptotique) en fonction de la longitude (pour faciliter le calcul, l'axe des X a été représenté par le 150° de longitude ouest).
(3) Pour la courbe semi-logarithmique, on a déterminé une solution par la méthode des moindres carrés. Si l'on connaît la latitude et la longitude, on peut donc calculer pour toute localité la date du minimum de *HF*.

Comme troisième étape, nous avons tenu compte de l'altitude. L'analyse de deux localités précises, Castlegar et Foothills, dont les données comprenaient plusieurs altitudes, a révélé un décalage dans la date du minimum de *HF*, égal, respectivement, à 0,02 et à 0,04 jour par mètre d'altitude. On a donc représenté en fonction de l'altitude l'ensemble des dates du minimum de *HF*, pour les neuf localités. Par la méthode des moindres carrés, on est arrivé, pour l'effet de l'altitude, à 0,026 jour par mètre, avec un coefficient de détermination multiple de 0,44. La représentation graphique semblait juste, et le résultat se situait entre ceux des deux localités précitées; la corrélation a donc été adoptée. En conséquence, on a normalisé les neuf dates du minimum d'humidité foliaire, par rapport au niveau de la mer, en soustrayant 0,026 fois l'altitude de chaque date. Le processus décrit ci-dessus pour la deuxième étape a été réitéré, sauf que la valeur représentant le mieux la latitude asymptotique s'est révélée être 42.

Toutes les équations permettant de calculer la date du minimum de *HF* ainsi que l'humidité foliaire pour n'importe quelle date, à partir de la latitude et de la longitude, y compris l'équation tenant compte de l'altitude, sont données ci-dessous :

Pour calculer la date du minimum d'humidité foliaire à partir de la latitude et de la longitude,

$$LATIT._n = 46 + 23{,}4 \times e^{-0{,}0360 \times (150 - LONG.)} \quad (1)$$

$$D_0 = 151 \times \left(\frac{LATIT.}{LATIT._n} \right) \quad (2)$$

Pour calculer la date du minimum d'humidité foliaire, à partir de la latitude, de la longitude et de l'altitude,

$$LATIT._n = 43 + 33{,}7 \times e^{-0{,}0351 \times (150 - LONG.)} \quad (3)$$

$$D_0 = 142{,}1 \times \left(\frac{LATIT.}{LATIT._n} \right) + 0{,}0172 \times ALT. \quad (4)$$

Pour calculer l'humidité foliaire à partir de la date (numéro d'ordre de la journée dans l'année) ainsi que de la date du minimum d'humidité foliaire,

$$N_j = \left| D_j - D_0 \right| \quad (5)$$

$$HF = 85 + 0{,}0189 \times N_j^2 \qquad N_j < 30 \quad (6)$$

$$HF = 32{,}9 + 3{,}17 \times N_j - 0{,}0288 \times N_j^2 \qquad 30 \leq ND < 50 \quad (7)$$

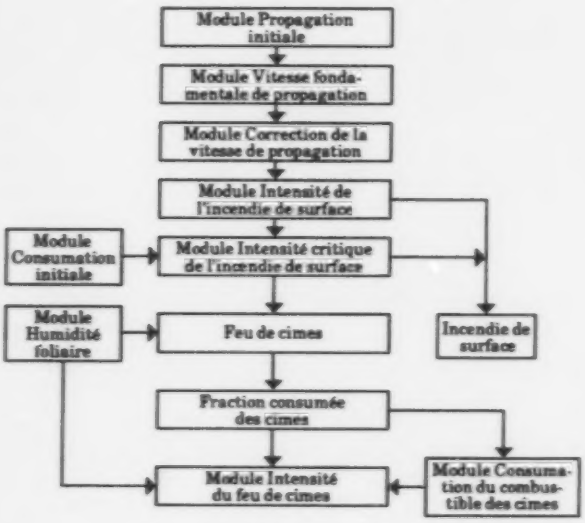
$$HF = 120 \qquad N_j \geq 50 \quad (8)$$

où *LATIT.* est la latitude, en degrés; $LATIT._n$, la latitude normalisée; *LONG.*, la longitude en degrés; *ALT.*, l'altitude, en mètres au-dessus du niveau de la mer, D_j, la date exprimée par le numéro d'ordre de la journée dans l'année; D_0, la date (numéro d'ordre) du minimum de *HF*; N_j, le nombre de jours entre D_j et D_0; *HF*, l'humidité foliaire (%).

Ce modèle possède des points faibles. D'abord, il ne tient pas compte de l'effet du feuillage neuf qui commence à débourrer vers la fin du minimum printanier. Cette nouvelle pousse, même si son humidité est très élevée, apporte très peu de poids sec au début, puis, graduellement, voit sa teneur en humidité approcher celle du vieux feuillage, à mesure que sa

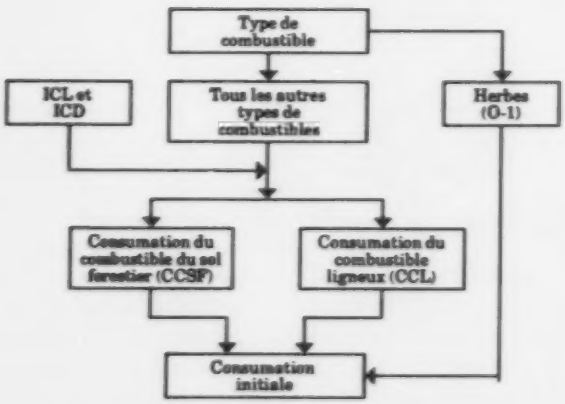
masse augmente. Dans un souci de simplification, on pose tout simplement que *HF* est égale à 120 % après la fin du minimum printanier. Deuxièmement, les localités retenues ont simplement été celles sur lesquelles on possédait des données; elles ne représentent aucunement la pleine amplitude géographique du phénomène.

7.0 Composantes principales



Composantes principales de la Méthode PCI

7.1 Consumation initiale de combustible



Consumation initiale

La consumation de combustible selon la Méthode PCI est scindée en deux domaines distincts : la consumation en surface et la consumation totale. Les résultats des modèles de la consumation du combustible de surface servent à déterminer le début de l'allumage de la cime. Toutefois, la consumation totale englobe les combustibles des cimes, dont la consumation ne peut pas être calculée tant que l'on n'a pas estimé de degré dans lequel les cimes sont touchées. Dans la présente partie, nous traiterons des modèles de consumation des combustibles de surface exigés ultérieurement par les modèles de la vitesse de propagation.

La Méthode PCI s'inspire surtout des données sur la consumation tirées d'incendies expérimentaux ainsi que de brûlages dirigés bien documentés (par exemple Muraro, 1975; Stocks, 1987a et b; Stocks, 1989; Quintilio et collab., 1977). La consumation des combustibles de surface, qui est la somme de la consumation des combustibles ligneux et de la consumation du sol forestier, en kilogrammes par mètre carré (poids anhydre), a été soumise à une régression non linéaire par rapport à l'indice du combustible disponible (*ICD*). On s'est servi de la forme générale d'équation (courbe en forme de S) qui a servi à la régression de la vitesse initiale de propagation par rapport à l'indice de propagation initiale (*IPI*). Les données sur la consumation du combustible sont moins nombreuses (parce que l'on ne peut pas effectuer de mesures précises de la consumation du combustible durant les incendies échappés) et elles sont plus dispersées que les données sur la vitesse de propagation. C'est pourquoi les données relatives à certains combustibles (C-2 et M-3/M-4; C-3 et C-4; ainsi que C-5 et C-6) ont été réunies. Les résultats sont montrés aux figures 3 et 4.

Les combustibles sur pied C-1 et C-7, O-1 (herbes) ainsi que S-1, S-2 et S-3 (rémanents) font exception à la régression susmentionnée. Pour C-1, la régression se fait plutôt en fonction de l'indice du combustible léger (*ICL*) parce que les matières disponibles sont des cladonies et des combustibles légers, la couche organique étant très mince ou absente. Pour C-7, 'a régression de la consumation du sol forestier est effectuée en fonction de l'*ICL*, tandis que celle du combustible ligneux se fait en fonction de l'*ICD*. La consumation du combustible de surface est la somme des deux valeurs prédites. La consumation du combustible de surface est une constante, dans le type O-1, vu l'absence de couche organique et la consumation, par hypothèse, totale des herbes sur le front de l'incendie. La quantité normale de combustible herbacé est de 0,3 kg/m^2, à moins d'indication contraire par suite de mesure. Pour les rémanents combustibles, la consumation du sol forestier et des

combustibles ligneux est soumise à une régression séparée en fonction de l'*ICD*, et les valeurs prédites doivent être additionnées pour donner la consumation prédite du combustible de surface.

Comme les données sur la consumation des combustibles sont dispersées et rares, il a fallu encore une fois, pour le lissage de la courbe, se fier à des expériences officieuses et utiliser des courbes asymptotiques et monotones ainsi qu'appliquer une fonction d'écrêtement aux valeurs élevées de l'*ICD* et de l'*ICL*. Les équations de toutes les courbes de la consumation des combustibles sont énumérées ci-dessous :

C-1

$$CCS = 1{,}5 \times \left[1 - e^{(-0{,}230 \times [ICL - 81])}\right] \quad (9)$$

Si $CCS < 0$, alors poser $CCS = 0$.

C-2, M-3 et M-4

$$CCS = 5{,}0 \times \left[1 - e^{(-0{,}0115 \times ICD)}\right]^{1{,}00} \quad (10)$$

C-3 ou C-4

$$CCS = 5{,}0 \times \left[1 - e^{(-0{,}0164 \times ICD)}\right]^{2{,}24} \quad (11)$$

C-5 ou C-6

$$CCS = 5{,}0 \times \left[1 - e^{(-0{,}0149 \times ICD)}\right]^{2{,}48} \quad (12)$$

C-7 — Calculer la consumation du combustible du sol forestier (*CCSF*) et la consumation du combustible ligneux (*CCL*) séparément et les additionner pour obtenir la consumation totale du combustible de surface (*CCS*) :

$$CCSF = 2 \times \left[1 - e^{(-0{,}104 \times [ICL - 70])}\right] \quad (13)$$

Si $CCSF < 0$, alors poser $CCSF = 0$.

$$CCL = 1{,}5 \times \left[1 - e^{(-0{,}0201 \times ICD)}\right] \quad (14)$$

$$CCS = CCSF + CCL \quad (15)$$

D-1

$$CCS = 1{,}5 \times \left[1 - e^{(-0{,}0183 \times ICD)}\right] \quad (16)$$

M-1 ou M-2

$$CCS = \left[\frac{\%C}{100} \times (CCS \text{ pour C-2})\right] + \left[\frac{\%F}{100} \times (CCS \text{ pour D-1})\right] \quad (17)$$

O-1

$$CCS = QCH \quad (18)$$

S-1

$$CCSF = 4{,}0 \times \left[1 - e^{(-0{,}025 \times ICD)}\right] \quad (19)$$

$$CCL = 4{,}0 \times \left[1 - e^{(-0{,}034 \times ICD)}\right] \quad (20)$$

S-2

$$CCSF = 10{,}0 \times \left[1 - e^{(-0{,}013 \times ICD)}\right] \quad (21)$$

$$CCL = 6{,}0 \times \left[1 - e^{(-0{,}060 \times ICD)}\right] \quad (22)$$

S-3

$$CCSF = 12{,}0 \times \left[1 - e^{(-0{,}0166 \times ICD)}\right] \quad (23)$$

$$CCL = 20{,}0 \times \left[1 - e^{(-0{,}0210 \times ICD)}\right] \quad (24)$$

Tous les types de rémanents

$$CCS = CCSF + CCL \quad (25)$$

où *CCS* est la consumation des combustibles de surface; *ICL*, l'indice du combustible léger, selon la Méthode de l'IFM; *CCSF*, la consumation des combustibles du sol forestier; *CCL*, la consumation des combustibles ligneux; *% C* et *% F*, respectivement le pourcentage de conifères et de feuillus; et *QCH*, la quantité de combustible herbacé (valeur normale 0,3 kg/m^2).

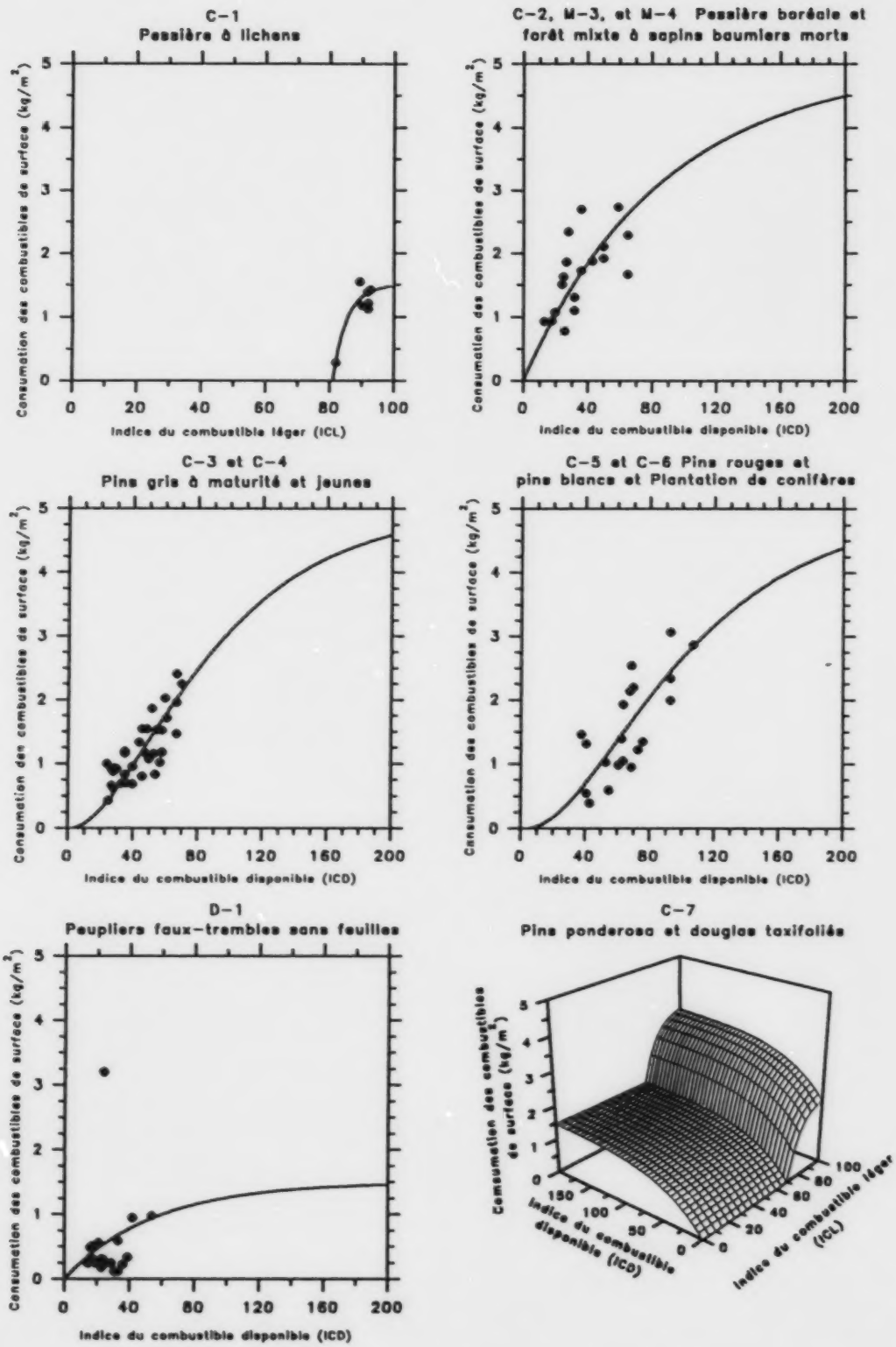


Figure 3. Courbes de la consumation des combustibles, asymptotiques et en forme de S pour les combustibles C-1, C-2, C-3, C-4, C-5, C-6, C-7, M-3, M-4 et D-1.

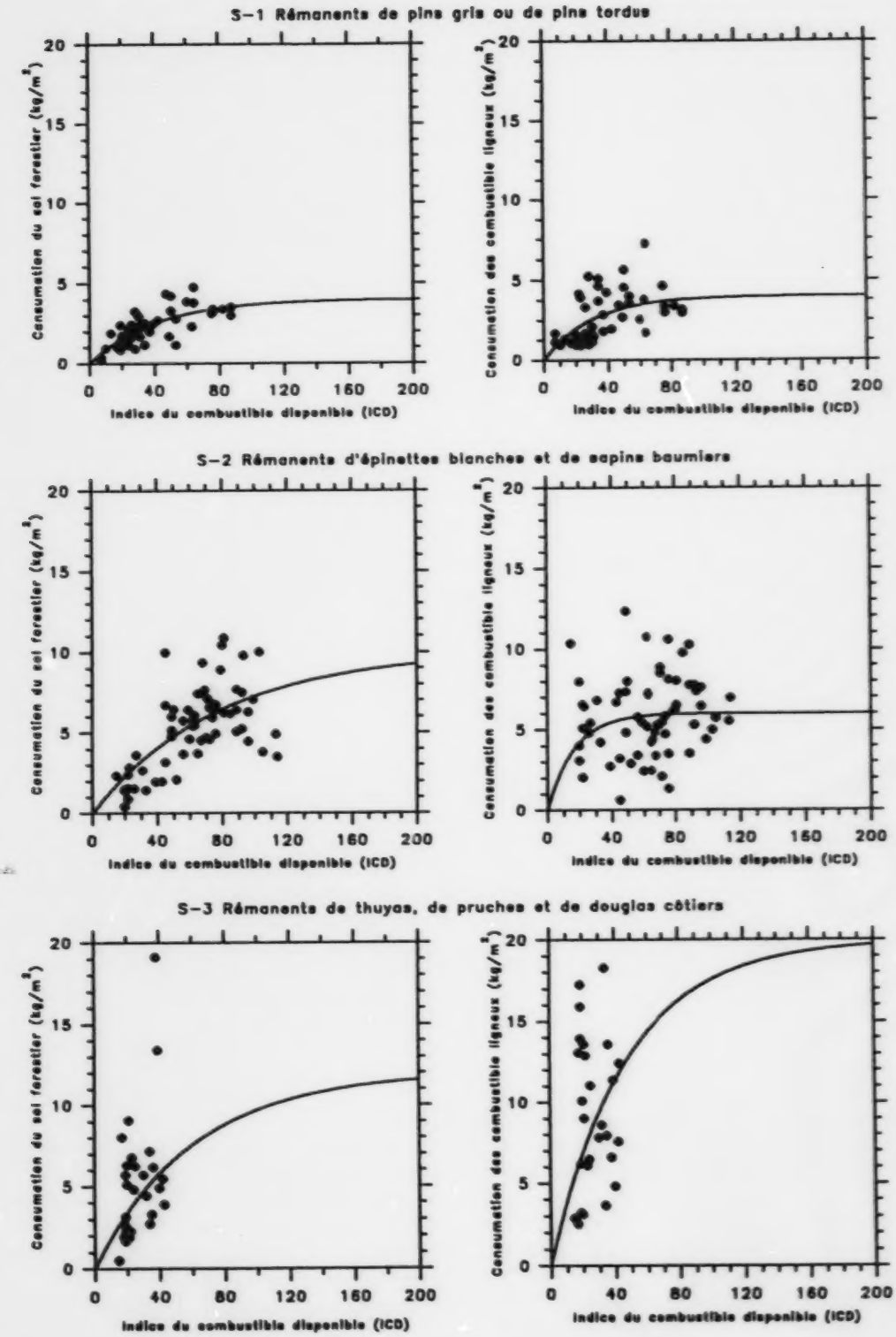
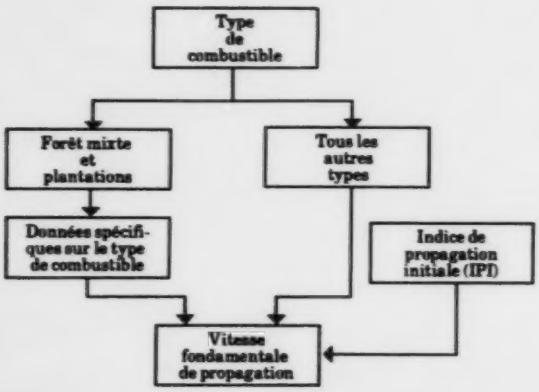


Figure 4. Courbes de la consumation du sol forestier en fonction de l'*ICD* ainsi que de la consumation des combustibles ligneux en fonction de l'*ICD*, asymptotiques et en forme de S pour les rémanents.

7.2 Vitesse de propagation

7.2.1 Équations fondamentales de la vitesse de propagation



Vitesse fondamentale de propagation

La vitesse finale de propagation prédite par la Méthode PCI est le résultat de la modification de la vitesse de propagation initiale par une fonction de l'indice du combustible disponible, l'effet de la pente et l'effet de l'incendie des cimes. Pour obtenir les équations de la vitesse initiale de propagation, on a réuni les données sur le comportement des incendies de forêt en sous-ensembles selon le type de combustible. On a intégré à plus d'un sous-ensemble les données relatives à certains gros incendies de forêt que l'on savait avoir consumé plusieurs types de combustibles forestiers. Pour toutes les équations de la vitesse de propagation ainsi tirées de la base de données de la Méthode PCI, la variable indépendante était l'indice de propagation initiale (*IPI*). Comme l'*IPI* amalgame des fonctions de l'indice du combustible léger et de la vitesse du vent, on a éprouvé, pour tous les sous-ensembles de combustibles, la corrélation multiple entre la vitesse de propagation et l'*ICL* ainsi que la vitesse du vent, séparément. On n'a trouvé aucun avantage à utiliser l'*IPI* seul : toutes les équations corrèlent donc la vitesse de propagation à l'*IPI*.

La vitesse prédite de propagation est la vitesse de propagation du front de l'incendie sur terrain horizontal, aux conditions d'équilibre. Le comportement de l'incendie à ses débuts, y compris le temps requis pour que l'incendie atteigne son régime de croisière, n'est pas pris en considération à ce moment du processus. En définissant la vitesse de propagation comme l'avance du front de l'incendie par unité de temps après l'atteinte de l'équilibre, on tient compte automatiquement de sa propagation aux cimes et par flammèches pour ce qui concerne l'influence de ces deux phénomènes sur la vitesse d'ensemble de propagation.

7.2.1.1 Combustibles naturels et combustibles dus à la coupe

Des diagrammes de dispersion de la vitesse en fonction de l'*IPI* dans les combustibles conifériens naturels (C-1, C-2, C-3, C-4, C-5 et C-7) sont donnés aux figures 5 et 6. L'équation retenue pour tous les types de combustibles dessine une courbe asymptotique en forme de S, les paramètres se rapportant à chaque type de combustible ayant été estimés à l'aide de techniques non linéaires. L'équation générale de la vitesse initiale de propagation ($V_{i.p.}$) a la forme suivante :

$$V_{i.p.} = a \times \left[1 - e^{(-b \times IPI)}\right]^c \qquad (26)$$

où a, b et c sont des paramètres propres à chaque type de combustible. La courbe satisfaisait à deux exigences : elle passe par l'origine, et sa pente tend à devenir nulle aux *IPI* élevés. La branche de pente raide coïncide avec la période de transition entre la consumation des combustibles de surface et l'embrasement des cimes. Le principe d'une vitesse qui devient constante à des *IPI* très élevés a été adopté comme voie d'approche prudente pour pallier l'absence de données concrètes. En général, les données expérimentales servent à construire la courbe dans sa partie basse à moyenne, tandis que les données recueillies sur les incendies de forêt échappés forment le corpus qui correspond aux *IPI* élevés à extrêmes. Cette dichotomie s'explique par le fait que les problèmes causés par les incendies échappés ainsi que les restrictions budgétaires interdisent habituellement les expériences de combustion à des régimes très intenses.

Les diagrammes de dispersion de la vitesse observée de propagation en vertu de l'*IPI* dans les peuplements de peupliers faux-trembles sans feuilles (D-1) et dans les rémanents (S-1, S-2 et S-3) sont montrés à la figure 6. Pour ces combustibles, on ne dispose pas de données sur les *IPI* élevés à extrêmes; toutefois, on applique une fonction d'écrêtement à la lumière de l'expérience officieuse. La forêt boréale mixte (figure 7) présente une large gamme de compositions différentes en conifères et en feuillus. En reconnaissance de cette diversité et faute de données

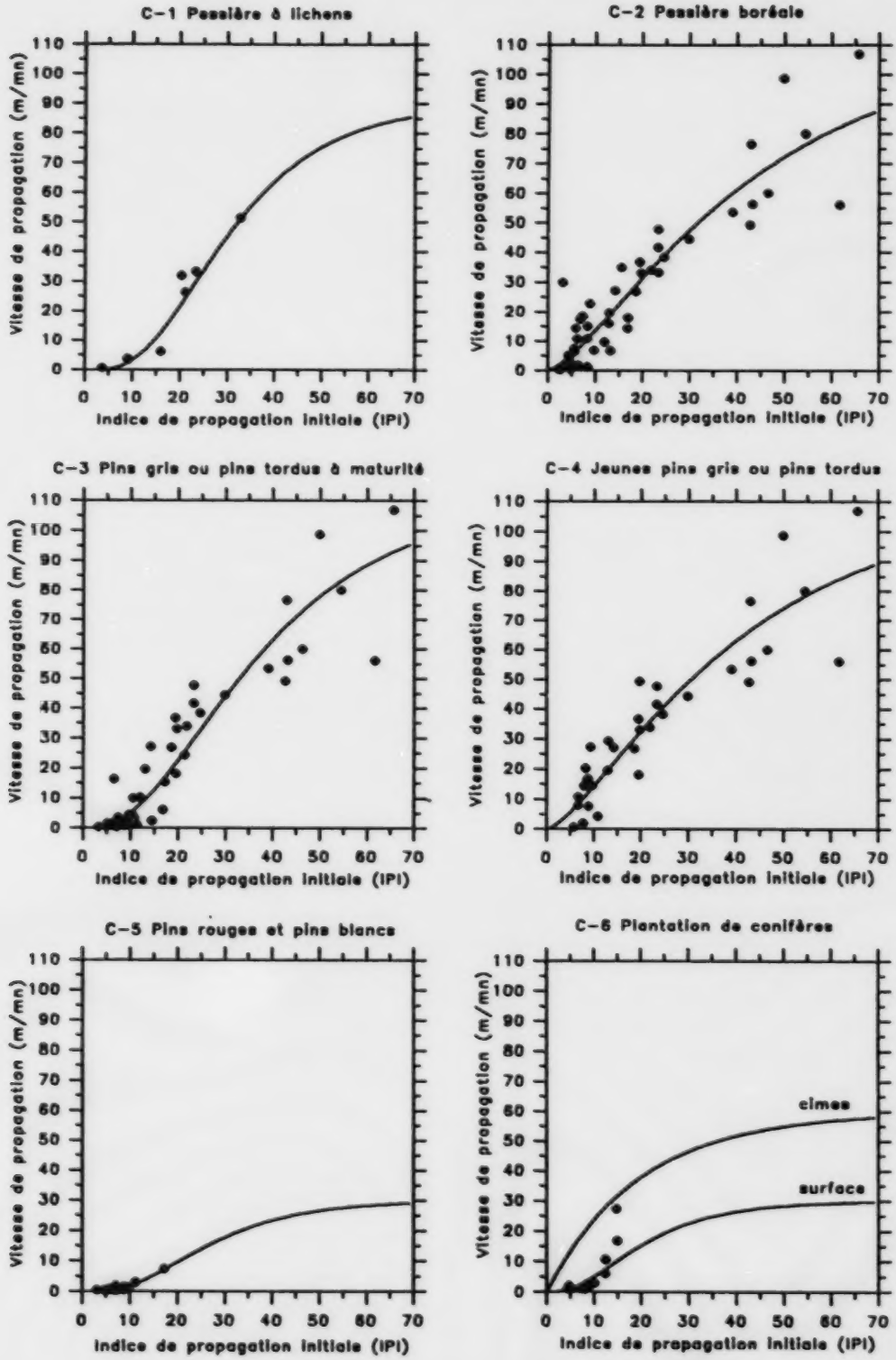


Figure 5. Courbes de la vitesse fondamentale de propagation en fonction de l'*IPI* pour les combustibles C-1 à C-6.

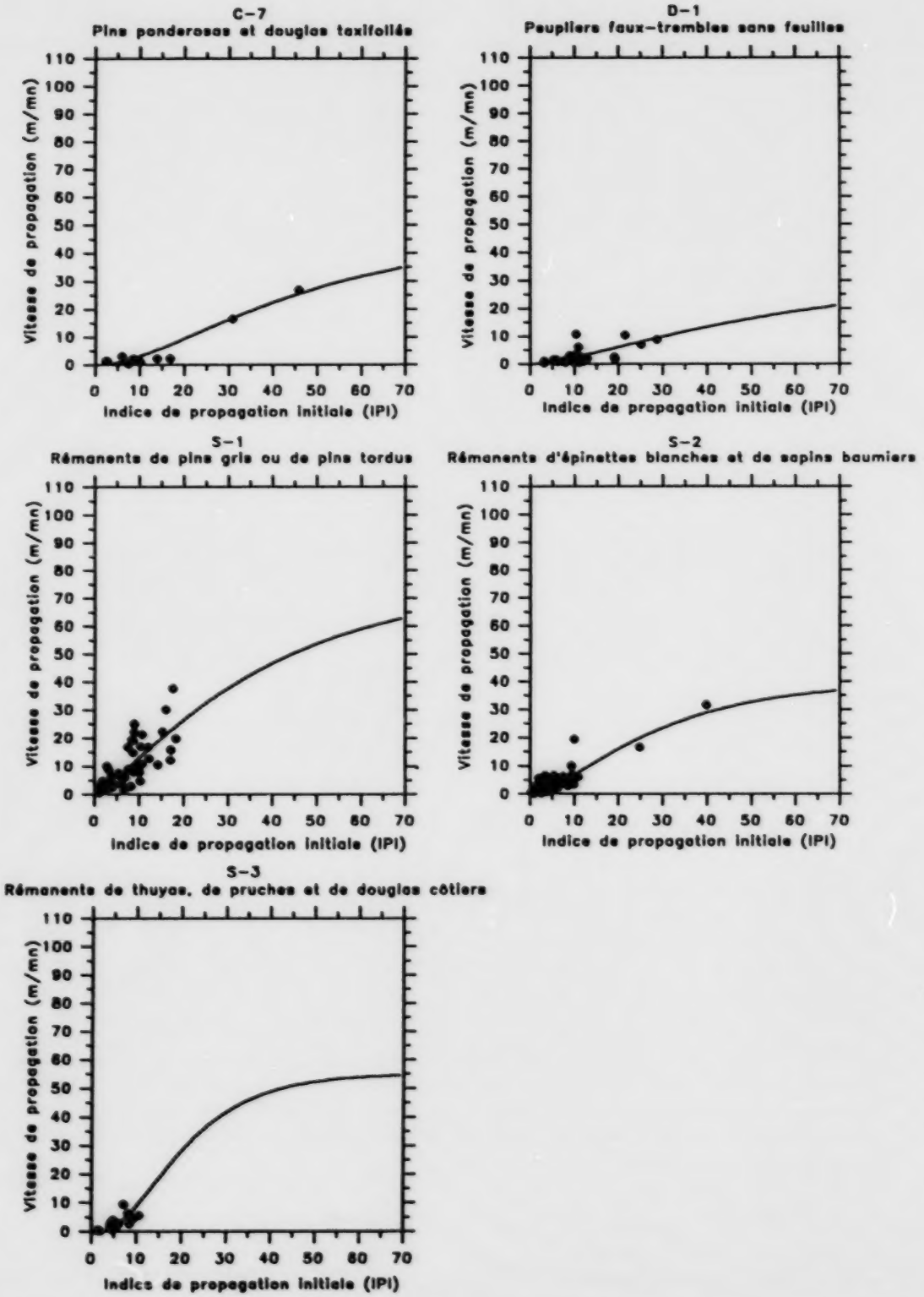


Figure 6. Courbes de la vitesse fondamentale de propagation en fonction de l'*IPI* pour les combustibles C-7, D-1, S-1, S-2 et S-3.

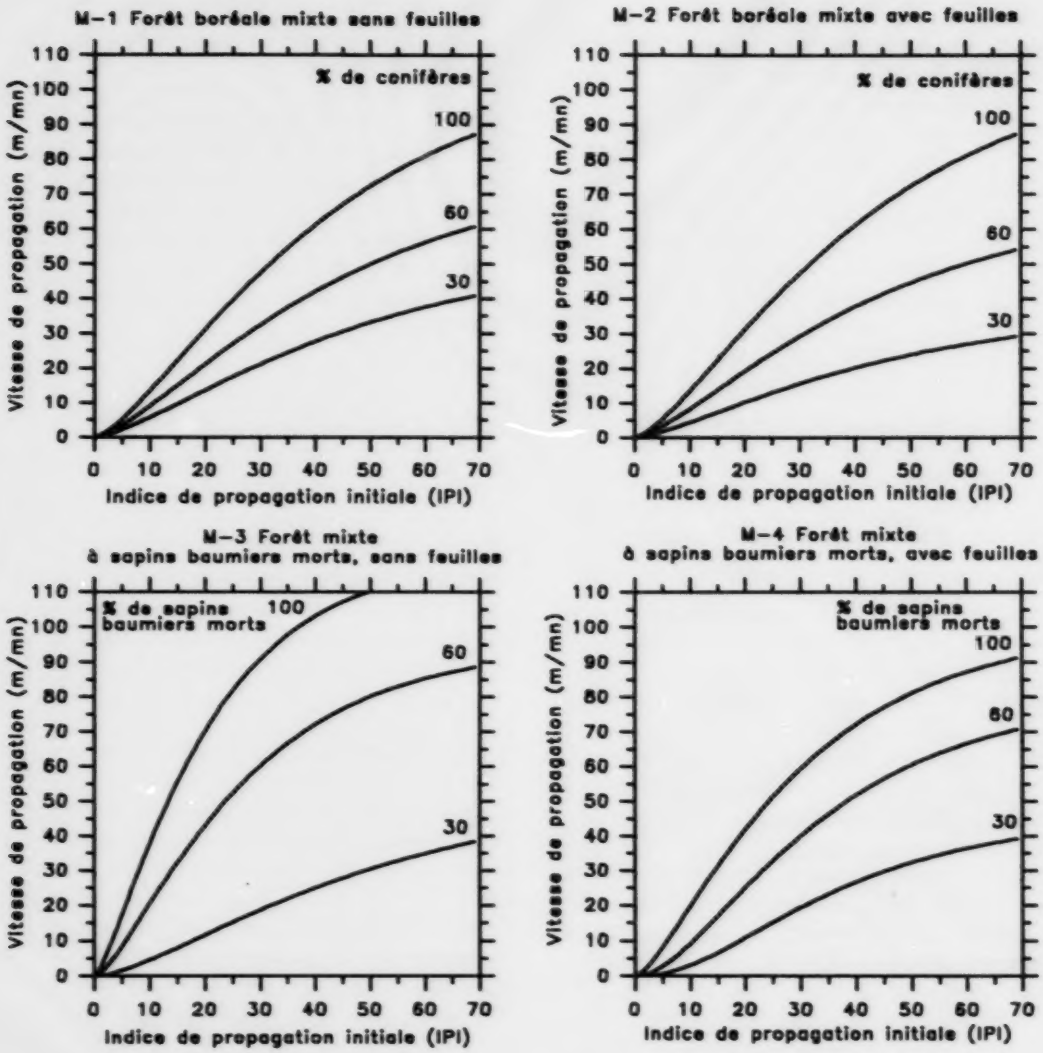


Figure 7. Courbes de la vitesse fondamentale de propagation en fonction de l'*IPI* pour les combustibles de types M-1 à M-4.

sur le comportement de l'incendie dans ce milieu, l'équation de la vitesse de propagation est un hybride des équations pour les combustibles C-2 et D-1. La $V_{i.p.}$ dans le combustible M-1 est donc donnée comme suit :

M-1 (sans feuilles)

$$V_{i.p.} = \left[\frac{\%C}{100} \times (V_{i.p.}\ \text{pour C}-2)\right] + \left[\frac{\%F}{100} \times (V_{i.p.}\ \text{pour D}-1)\right] \quad (27)$$

où $\%\ C$ est le pourcentage de conifères et $\%\ F$ le pourcentage de feuillus. Pour le combustible M-2, l'équation est la suivante :

M-2 (avec feuilles)

$$V_{i.p.} = \left[\frac{\%C}{100} \times (V_{i.p.}\ \text{pour C}-2)\right] + 0{,}2 \times \left[\frac{\%F}{100} \times (V_{i.p.}\ \text{pour D}-1)\right] \quad (28)$$

Cette dernière équation est semblable à l'équation [27], sauf que le taux de feuillus est multiplié par 0,2.

Tableau 6. Valeurs des coefficients de la vitesse de propagation pour tous les types de combustibles sauf les peuplements mixtes

Type de combustible	*a*	*b*	*c*
C-1	90	0,0649	4,5
C-2	110	0,0282	1,5
C-3	110	0,0444	3,0
C-4	110	0,0293	1,5
C-5	30	0,0697	4,0
C-6	30	0,0800	3,0
C-7	45	0,0305	2,0
D-1	30	0,0232	1,6
S-1	75	0,0297	1,3
S-2	40	0,0438	1,7
S-3	55	0,0829	3,2
O-1a	190	0,0310	1,4
O-1b	250	0,0350	1,7

On ne possède aucune donnée sur la vitesse de propagation dans les feuillus l'été ou au débourrement, mais on pose par hypothèse qu'elle serait de 20 % de la vitesse observée quand les feuilles sont absentes. Pour les peuplements mixtes des types M-3 et M-4, qui comprennent une proportion de sapins baumiers morts, l'équation de la vitesse initiale de propagation devrait être utilisée de concert avec les équations suivantes, afin de calculer les paramètres *a*, *b* et *c*, comme suit :

M-3

$$a = 170 \times e^{\left(\frac{-35,0}{\%\, S_{b.m.}}\right)} \quad (29)$$

$$b = 0,082 \times e^{\left(\frac{-36,0}{\%\, S_{b.m.}}\right)} \quad (30)$$

$$c = 1,698 - 0,00303 \times \%\, S_{b.m.} \quad (31)$$

M-4

$$a = 140 \times e^{\left(\frac{-35,5}{\%\, S_{b.m.}}\right)} \quad (32)$$

$$b = 0,0404 \quad (33)$$

$$c = 3,02 \times e^{(-0,00714 \times \%\, S_{b.m.})} \quad (34)$$

où $\%\, S_{b.m.}$ est le pourcentage de sapins baumiers morts. La figure 7 montre les courbes obtenues pour diverses combinaisons de paramètres (composition de feuillus et de résineux et pourcentage de sapins baumiers morts) dans les peuplements mixtes. Les coefficients *a*, *b*, et *c* de tous les types restants de combustibles, naturels et dus à la coupe, sont donnés au tableau 6.

7.2.1.2 Combustibles des plantations

Comme les plantations de conifères sont plus structurées et moins variables que les peuplements naturellement régénérés, la séparation complexe des feux de surface et de cimes y est plus facile à modéliser. Van Wagner (1989) s'est attaqué à cette séparation; toutefois, le modèle repose sur des notions dont il sera question plus loin dans le présent document. Il sera donc présenté à la section 7.2.5.

7.2.1.3 Combustibles herbacés

On ne possède aucun corpus de données sur le comportement des incendies d'herbage au Canada. Un indice de feu d'herbage a été calculé il y a longtemps par Wright et Beall (1938); toutefois, il était fondé sur de petits incendies expérimentaux, dont on n'avait pas enregistré de façon quantitative la vitesse de propagation. Les estimations de la vitesse de propagation de l'incendie dans ce type de combustible se fondent sur des fonctions de régression dérivées de données australiennes sur les feux d'herbage (J.S. Gould et N.P. Cheney, 1991, Australian National Bushfire Research Institute, correspondance personnelle). Les données concernaient les herbes hautes et les herbes courtes (coupées), les herbes hautes étant représentatives des herbages secs du milieu de l'été, tandis que les herbes coupées représentaient l'enchevêtrement printanier d'herbes aplaties par la neige. Le pourcentage de tiges d'herbes fanées ou la proportion de tiges ayant séché complètement et ayant cessé de croître est considéré comme influant énormément sur le comportement des feux d'herbage. Faute de travaux de recherche concluants sur le sujet, on a adopté une simple relation linéaire d'après le raisonnement que, dans un herbage, le feu ne devrait vraisemblablement pas se propager lorsque moins de 50 % des tiges sont fanées (Wright et Beall, 1938) et que la vitesse de propagation du feu dans les herbages varie en gros en raison du pourcentage de végétaux fanés ou morts

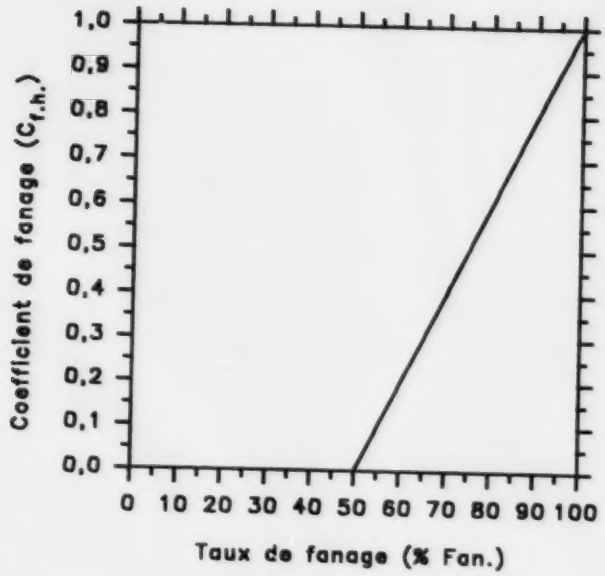


Figure 8. Relation entre le taux de fanage des herbes et son coefficient.

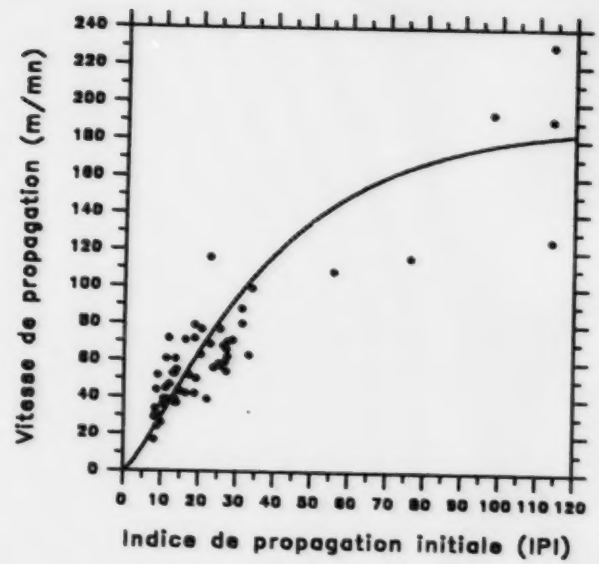


Figure 9. Relation entre l'*IPI* et la vitesse fondamentale de propagation dans les herbes coupées (ou aplaties) complètement fanées (O-1a).

(Van Wagner, 1975). L'équation suivante sert à corriger la vitesse de propagation de l'incendie dans les herbages, lorsque le degré de fanage est inférieur à 100 % (Voir également la figure 8) :

O-1 (herbes)

$$C_{f.h.} = 0{,}02 \times \%\,Fan. - 1{,}0 \qquad \%\,Fan. > 50 \qquad (35)$$

où $C_{f.h.}$ est le coefficient de fanage des herbes et $\%\,Fan.$ le taux de fanage (%); toutefois, si $\%\,Fan. \leq 50$, alors $C_{f.h.} = 0$.

L'étape suivante de la construction de l'équation de la vitesse de propagation a été de prendre les vitesses de propagation tirées des données australiennes et d'effectuer des régressions séparées de la vitesse de propagation en fonction de l'*IPI* pour les herbes hautes et les herbes courtes. C'est ainsi que nous avons obtenu les courbes des figures 9 et 10, décrites par l'équation générale de la vitesse de propagation (équation [26]), qui intègre les coefficients applicables de régression (a, b et c) du tableau 6.

La vitesse de propagation est ensuite corrigée pour tenir compte de l'effet du fanage des herbes. En la multipliant par le coefficient de fanage (équation [35]), on obtient l'équation suivante qui exprime complètement la vitesse de propagation :

$$V_p = a \times \left[1 - e^{(-b \times IPI)}\right]^c \times C_{f.h.} \qquad (36)$$

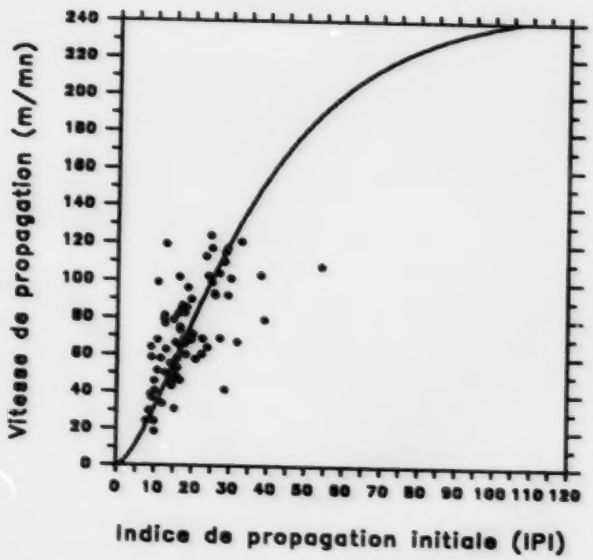
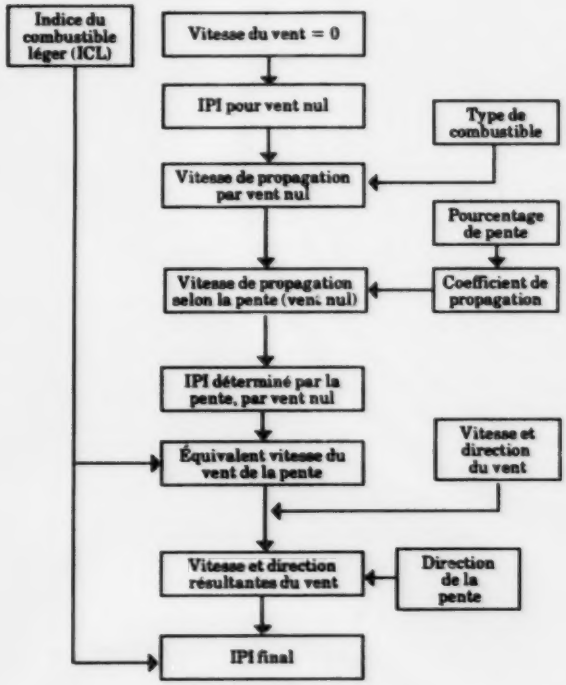


Figure 10. Relation entre l'*IPI* et la vitesse fondamentale de propagation dans les herbes hautes (sur pied) complètement fanées (O-1b).

où V_p est la vitesse de propagation de l'incendie en surface; a, b et c, des constantes spécifiques du combustible, selon le tableau 6; $C_{f.h.}$, le coefficient de

fanage des herbes d'après l'équation [35]. Aucune autre correction (c'est-à-dire masse du combustible, propagation à la cime) n'est nécessaire; cette vitesse de propagation peut donc être considérée comme la vitesse finale prévue du front de l'incendie.

7.2.2 Effet de la pente sur la propagation de l'incendie



Indice de propagation initiale

Une nouvelle voie d'approche a été suivie pour tenir compte des effets additifs de la vitesse du vent et de la pente sur la propagation de l'incendie, dans diverses situations. L'ancienne méthode de calcul prévoyait quatre interactions possibles entre le vent et la pente, parmi lesquelles il était demandé de choisir et auxquelles il fallait appliquer les règles utiles. Elle exigeait de connaître la direction de la propagation par rapport à la direction du vent et à celle de la pente avant de pouvoir prédire la vitesse de propagation. Afin d'utiliser un modèle plus général et plus homogène (c'est-à-dire sans points de coupure à une combinaison particulière des paramètres pente et vent, comme c'était le cas dans la version provisoire de 1984), il a été choisi, pour la version finale de la Méthode PCI, d'exprimer par des vecteurs la vitesse et le sens de la propagation. Essentiellement, l'influence du vent et l'influence de la pente sur la vitesse de propagation s'additionnent. Afin de tenir justement compte des influences, la pente est transformée en équivalent de la vitesse du vent, qui s'ajoute (par addition de vecteurs, afin de tenir compte des différences de direction) à la vitesse « observée » du vent pour donner le vent résultant (c'est-à-dire la vitesse et la direction résultantes). Le vent résultant entre ensuite dans tous les calculs ultérieurs, y compris celui de l'*IPI* et du rapport de la longueur à la largeur (L/l). Ces notions ont été discutées plus en détail par McAlpine et collab. (1991).

Le nouveau processus est identique à la vieille méthode, dans sa première étape; en effet, il s'agit de déterminer le pourcentage de la pente du terrain, comme suit :

$$\% \text{ de pente} = \frac{\text{dénivellation}}{\text{dist. horizontale}} \times 100 \qquad (37)$$

Plusieurs méthodes permettent de déterminer la pente. Si on possède une carte topographique, la plus facile est de mesurer l'écart entre les courbes de niveau (dénivellation) sur une distance donnée. La mesure de la pente devrait toujours se faire dans le sens ascendant direct de la pente, c'est-à-dire dans le sens où à partir du point de projection, la pente est maximale. La pente (angle mesuré sur place) peut être convertie en pourcentage par l'équation suivante :

$$\% \text{ de pente du terrain} = 100 \times \tan(\alpha) \qquad (38)$$

où α est le nombre de degrés par lesquels la pente s'élève au-dessus de l'horizontale. Le pourcentage de pente sert ensuite à calculer le coefficient de propagation (*CP*) (Van Wagner, 1977c) :

$$CP = e^{3{,}533 \times \left(\frac{\% P}{100}\right)^{1{,}2}} \qquad (39)$$

où *% P* est le pourcentage de pente du terrain. L'équation [39] n'est pas recommandée pour les pentes de plus de 60 %. Au-dessus de 60 %, le coefficient de propagation augmente de façon extrêmement rapide même si la pente, elle, augmente peu, et on ne dispose d'aucune donnée permettant de vérifier la validité de la fonction au-dessus de ce point. La figure 11 montre la relation décrite par l'équation [39].

Afin de déterminer l'influence de la pente sur la vitesse de propagation quand la vitesse du vent est nulle, on calcule l'*IPI* par vent nul ($IPI_{0,\Delta}$) au moyen des équations normales relatives à l'*IPI* (Van Wagner, 1987) (Voir les équations [45], [46], [52] et [53]), de l'*ICL* et d'un vent de 0 km/h. L'*IPI* par vent nul sert

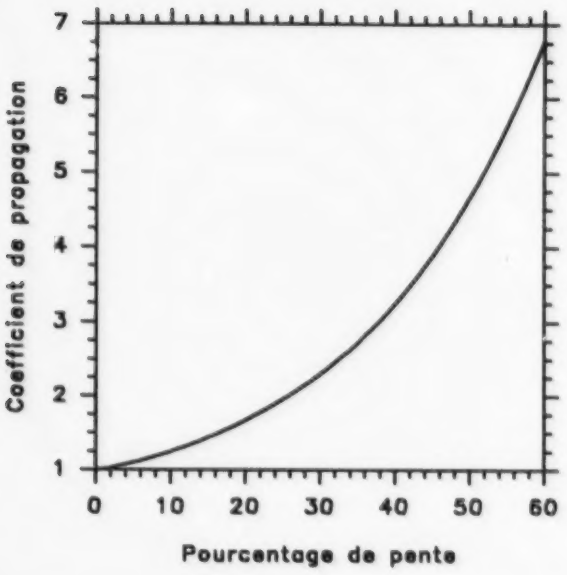


Figure 11. Relation entre le pourcentage de pente du terrain et le coefficient de propagation servant à corriger la vitesse de propagation de l'incendie sur les terrains en pente (Van Wagner, 1977).

ensuite, avec l'équation convenable décrivant la vitesse de propagation, à calculer, pour un combustible particulier, la vitesse de propagation par vent nul. Cette dernière vitesse est ensuite multipliée par le coefficient de propagation pour donner la vitesse de propagation par vent nul corrigée selon la pente ($V_{p.c.}$) :

$$V_{p.c.} = V_{p.z.} \times CP \qquad (40)$$

où $V_{p.z.}$ est la vitesse de propagation par vent nul (vent zéro), et CP le coefficient de pente.

Jusqu'à maintenant, nous avons calculé la vitesse de propagation dans les conditions observées d'humidité du combustible, compte tenu de la pente, mais sans tenir compte de l'effet du vent. La vitesse de propagation par vent nul, corrigée par rapport à la pente, est maintenant transformée en vitesse du vent ou en ce qui peut être considéré comme l'équivalent vitesse du vent de la pente observée. La transformation de la pente en cet équivalent autorise l'addition de la vitesse observée du vent et de l'équivalent vitesse du vent de la pente (calculé). On y parvient en inversant les équations de la vitesse du vent en fonction de l'*IPI*, de sorte qu'en utilisant un paramètre tenant lieu de la vitesse de propagation (dans ce cas la vitesse de propagation par vent nul corrigée en fonction de la pente), on obtient une valeur de l'*IPI*. Comme la plupart des équations de la vitesse de propagation en fonction de l'*IPI* épousent la même forme, l'équation générale de l'*IPI* déduite de la vitesse de propagation est la suivante :

$$IPI_{p.z.} = \frac{\ln\left[1 - \left(\frac{V_{p.c.}}{a}\right)^{\frac{1}{c}}\right]}{-b} \qquad (41)$$

où $IPI_{p.z.}$ est l'*IPI* par vent nul, corrigé selon la pente; $V_{p.c.}$, la vitesse de propagation par vent nul multipliée par le coefficient de pente; a, b et c, les constantes des équations de la vitesse de propagation propres au combustible.

L'équation [41] ne fonctionne pas pour deux types de combustibles : les forêts mixtes (M-1 et M-2) ainsi que les herbes (O-1). Pour les combustibles M-1 et M-2, on utilise l'équation suivante :

$$IPI_{p.z.} = \frac{\ln\left[1 - \left(\frac{100 - V_{p.c.}}{\%C \times a}\right)^{\frac{1}{c}}\right]}{-b} \qquad (42)$$

où $IPI_{p.z.}$ est l'*IPI* par vent nul, corrigé selon la pente; $V_{p.c.}$, la vitesse de propagation par vent nul multipliée par le coefficient de pente; a, b et c, les constantes des équations de la vitesse de propagation propres au combustible résineux (C-2) compris dans les forêts mixtes; $\%C$, le pourcentage de conifères entrant dans la composition du peuplement.

Pour les herbes (O-1), l'équation prend la forme suivante :

$$IPI_{p.z.} = \frac{\ln\left[1 - \left(\frac{V_{p.c.}}{C_{f.h.} \times a}\right)^{\frac{1}{c}}\right]}{-b} \qquad (43)$$

où $IPI_{p.z.}$ est l'*IPI* par vent nul, corrigé selon la pente; $V_{p.c.}$, la vitesse de propagation par vent nul multipliée par le coefficient de pente; $C_{f.h.}$, le pourcentage de matières végétales mortes ou fanées, calculé par l'équation [35].

L'étape suivante consiste à transformer la pente en équivalent de la vitesse du vent (*ÉVV*). Pour cela, on inverse les équations de l'*IPI* et on combine l'*IPI* et l'*ICL* pour obtenir la vitesse du vent :

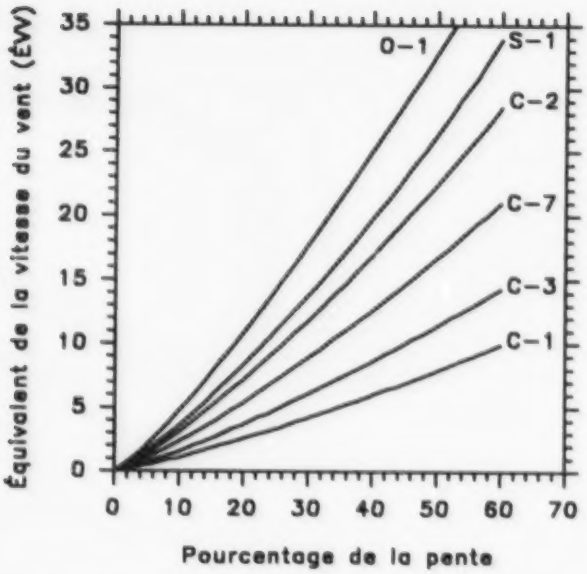


Figure 12. Équivalent vitesse du vent en fonction du pourcentage mesuré de la pente, pour plusieurs types de combustibles; l'*ICL* a été fixé à 89.

$$\acute{E}VV = \frac{\ln\left[\dfrac{IPI_{p.z.}}{0{,}208 \times f(ICL)}\right]}{0{,}05039} \tag{44}$$

où $IPI_{p.z.}$ est l'*IPI* par vent nul, corrigé selon la pente; $f(ICL)$, la fonction de l'*ICL* tirée de l'équation de l'*IPI*, comme suit :

$$f(ICL) = 91{,}9 \times e^{(-0{,}1386 \times m)} \times \left[1 + \frac{m^{5{,}31}}{4{,}93 \times 10^{7}}\right] \tag{45}$$

où

$$m = \frac{147{,}2 \times (101 - ICL)}{59{,}5 + ICL} \tag{46}$$

L'équivalent de la vitesse du vent est l'effet que la pente exercerait sur la vitesse de propagation si cette pente était à une vitesse du vent. La figure 12 montre l'équivalent vitesse du vent de plusieurs types de combustibles pour une gamme de pentes. L'ÉVV calculé peut maintenant être ajouté à la vitesse observée du vent pour déterminer le vent résultant qui influe sur l'incendie. L'écart entre la direction du vent et la direction de la pente sert alors à additionner les deux vecteurs vent (vent observé et équivalent de la vitesse du vent)[1]. L'addition des vecteurs se fait par la série d'équations suivantes :

$$VV_x = \left|V_v \times \sin(Az_v)\right| + \left|\acute{E}VV \times \sin(Az_p)\right| \tag{47}$$

$$VV_y = \left|V_v \times \cos(Az_v)\right| + \left|\acute{E}VV \times \cos(Az_p)\right| \tag{48}$$

$$V_{r.v.} = \sqrt{(VV_x^2 + VV_y^2)} \tag{49}$$

$$Az_{v.r.} = \arccos\left(\frac{VV_y}{V_{r.v.}}\right) \tag{50}$$

où VV_x est le vecteur vent résultant dans la direction de l'axe des x; VV_y, le vecteur vent résultant dans la direction de l'axe des y; Az_v, l'azimut du vent; Az_p, l'azimut de la pente vers le haut; $V_{r.v.}$, la vitesse résultante du vent; $Az_{v.r.}$, l'azimut du vent résultant.

Les fonctions sinus et cosinus des équations [47] à [50] semblent inversées par rapport à ce que l'on trouverait dans un manuel ordinaire d'algèbre. Cette anomalie apparente provient du relèvement compas, dont la valeur augmente dans le sens horaire, tandis qu'en algèbre, la valeur des angles augmente dans le sens contraire. En inversant l'emploi des fonctions sinus et cosinus, on résout le problème. En algèbre, on ne trouve pas que des sens positifs; les valeurs négatives sont tout à fait possibles. Pour transformer les $Az_{v.r.}$ possiblement négatifs en relèvements compas plus faciles à comprendre, on utilise l'équation [51] comme suit :

Si $VV_x < 0$, alors

$$Az_{v.r.} = 360 - Az_{v.r.} \tag{51}$$

Cette vitesse du vent résultant sert ensuite à tous les calculs ultérieurs où entre la vitesse du vent, y compris l'*IPI* et le rapport *L/l* de la longueur à la largeur. L'azimut du vent résultant ($Az_{v.r.}$) indique le sens de la propagation de l'incendie. L'équation de l'*IPI*[2] (Van Wagner, 1987), est donnée ci-dessous pour information :

---

1. Le vecteur vent est tout simplement la vitesse du vent à laquelle on attribue une direction.

2. L'*IPI* utilisé dans la Méthode PCI a été légèrement modifié à la toute dernière extrémité. Dans les cas où l'*ICL* est très faible et la vitesse du vent très élevée, on a obtenu, par calcul, des *IPI* mesurables qui se traduiraient par une vitesse prédite de propagation de l'incendie. Pour corriger le problème, le paramètre $f(V)$ de l'équation de l'*IPI* est assorti de la condition supplémentaire suivante :

Si $V_v > 40$, alors

$$f(V) = 12 \times \left[1 - e^{-0{,}0818 \times (V_{r.v.} - 28)}\right] \tag{53a}$$

Cette équation remplacerait l'équation 53, si le vecteur vent était supérieur à 40 km/h.

$$IPI = 0{,}208 \times f(V) \times f(ICL) \quad (52)$$

où

$$f(V) = e^{0{,}05039 \times V_{r.v.}} \quad (53)$$

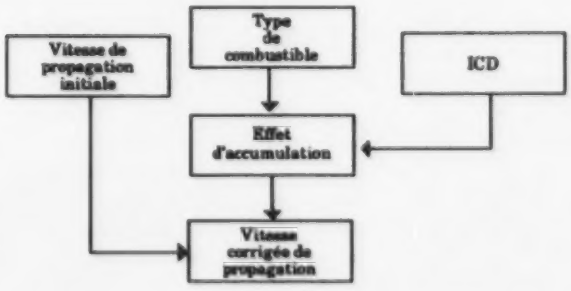
et où $f(ICL)$ est donné ci-dessus (équations [45] et [46]), tandis que $V_{r.v.}$ est la vitesse résultante du vent.

Dans cette application, il faut faire attention à la direction du vent. Normalement, les stations météorologiques communiquent la direction d'où souffle le vent et non le sens dans lequel il souffle. Ici, nous avons besoin du sens vers où souffle le vent; il faut donc corriger de 180° le sens du vent communiqué par les stations météorologiques.

Les équations de la forme de l'incendie ou du rapport de la longueur à la largeur (rapport *L/l*) sont données dans la section sur les fonctions elliptiques. L'*IPI* calculé précédemment est une fonction non seulement de la vitesse du vent et de l'*ICL*, mais également de la pente. Il n'est donc pas égal à l'*IPI* normal calculé pour la Méthode de l'IFM, et il devrait en être distingué. Cet *IPI* est un *IPI* local, qui subit l'influence de la topographie.

La présente méthode tient automatiquement compte de beaucoup des problèmes épineux qui se posent quand on additionne les vecteurs vent et vitesse de propagation selon la pente. Par exemple, si le vent souffle directement vers le bas de la pente et qu'il soit exactement contrecarré par l'effet de la pente, on obtiendrait, par addition des deux vecteurs, une vitesse nulle de propagation. En additionnant les vitesses du vent, on peut obtenir une vitesse résultante nulle pour le vent, mais cela se traduirait néanmoins par une vitesse mesurable de propagation.

7.2.3 Effet du combustible disponible sur la vitesse de propagation



Corrections de la vitesse de propagation

Les équations fondamentales de la vitesse de propagation données à la section 7.2.1 se fondent sur l'*IPI* exclusivement. Cependant, l'*IPI* dépend d'un seul indice de l'humidité du combustible, c'est-à-dire l'indice du combustible léger (*ICL*), qui est affecté d'un décalage de seulement une journée environ de météo normale. Cela signifie que l'*IPI* se stabilise dans les deux ou trois jours qui suivent une saturation complète du combustible, c'est-à-dire qu'il ne devrait y avoir aucune augmentation de la vitesse de propagation, même si le temps sec persiste plusieurs jours. Logiquement, avec l'assèchement de l'ensemble du complexe de combustibles, le combustible disponible augmente, et la consumation supérieure de combustible devrait influer dans une certaine mesure sur la vitesse de propagation. Selon la Méthode de l'IFM, la principale mesure relative de l'augmentation du poids des matière à consumer, à mesure que la sécheresse se prolonge, est l'indice du combustible disponible (*ICD*), dont le décalage temporel est, dans la pratique, d'une dizaine de jours de météo normale. Il accusera un effet distinct jusqu'à un mois après la saturation du combustible. Malheureusement, aucune analyse statistique des données disponibles sur les incendies n'a réussi à démontrer l'effet secondaire de l'*ICD* sur la vitesse de propagation. Cette carence a été attribuée aux lacunes des données empiriques. De fait, les données ont été collectées sans que l'on ne se souciât de se documenter sur toute la gamme des valeurs de l'*ICD*. L'effet d'accumulation (*EA*), fonction de l'*ICD*, a donc été conçu sous la forme d'un multiplicateur de l'équation fondamentale de propagation fondée sur l'*IPI*. Par hypothèse, la vitesse de propagation doit être nulle lorsque l'*ICD* est nul et elle augmente rapidement en raison de l'*ICD* et, enfin, elle plafonne, lorsque l'*ICD* est infini. C'est alors qu'on introduit q, la proportion de la vitesse maximale de propagation (quel que soit l'*IPI*) qu'on peut atteindre à un *ICD* normal dit ICD_n (fixé à 50, ayant été calculé comme l'*ICD* moyen de tous les incendies dans la base de données de la Méthode PCI). De façon quelque peu subjective, on a assigné à chaque type de combustible un q de 0,70 à 1,0, selon le taux auquel la siccité croissante en profondeur pourrait influer sur la vitesse de propagation. Cependant, chaque ensemble de données empiriques sur le type de combustible possède son propre *ICD* moyen (ICD_0), auquel l'équation de la vitesse de propagation fondée sur l'*IPI* devrait, on le pense, le mieux s'appliquer. L'effet d'accumulation doit donc s'exprimer d'après l'ICD_0, de même que d'après q, de façon à prendre une forme générale pour tous les types de combustibles. Si ICD_n égale 50, l'effet d'accumulation (*EA*) aurait pour équation :

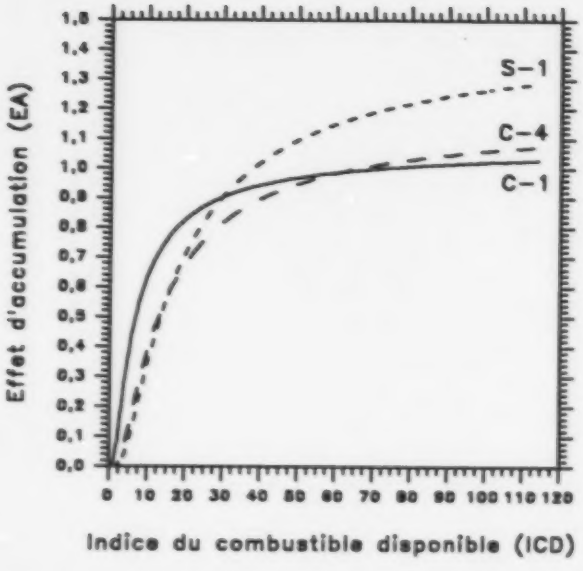


Figure 13. L'effet d'accumulation en fonction de q et de l'ICD_0 pour les combustibles C-1, C-4 et S-1.

$$EA = e^{\left[50 \times \ln(q) \times \left(\frac{1}{ICD} - \frac{1}{ICD_0}\right)\right]} \quad (54)$$

où ICD_0 est l'ICD moyen du type de combustible. La fonction égale 1 lorsque l'ICD égale ICD_0 ou que q égale 1, comme il se devrait (figure 13). Les valeurs de l'ICD_0 et de q sont données pour chaque type de combustible au tableau 7, de même que les valeurs maximales possibles de l'effet d'accumulation. L'effet d'accumulation pourrait être facilement calculé pour tout type de combustible et tout ICD et il pourrait être appliqué, comme facteur secondaire, à l'équation principale de la vitesse de propagation fondée sur l'IPI.

$$V_p = V_{i.p.} \times EA \quad (55)$$

où V_p est la vitesse de propagation (m/mn); $V_{i.p.}$, la vitesse intermédiaire de propagation en surface, corrigée en fonction de la pente; EA, la fonction décrite précédemment.

L'effet d'accumulation peut influer considérablement sur la prédiction de la vitesse de propagation, selon la valeur de l'IPI et, bien entendu, selon celle de l'ICD et la nature du combustible. La figure 14 montre

Tableau 7. ICD_0, q et EA maximal de chaque type de combustible

Type combustible	ICD_0	q	EA maximal
C-1	72	0,90	1,076
C-2	64	0,70	1,321
C-3	62	0,75	1,261
C-4	66	0,80	1,184
C-5	56	0,80	1,220
C-6	62	0,80	1,197
C-7	106	0,85	1,134
D-1	32	0,90	1,179
M-1	(50)[a]	(0,80)	1,250
M-2	(50)	(0,80)	1,250
M-3	(50)	(0,80)	1,250
M-4	(50)	(0,80)	1,250
S-1	38	0,75	1,460
S-2	63	0,75	1,256
S-3	31	0,75	1,590
O-1	–	1,00	1,000

[a] Les valeurs entre parenthèses ont été fixées arbitrairement.

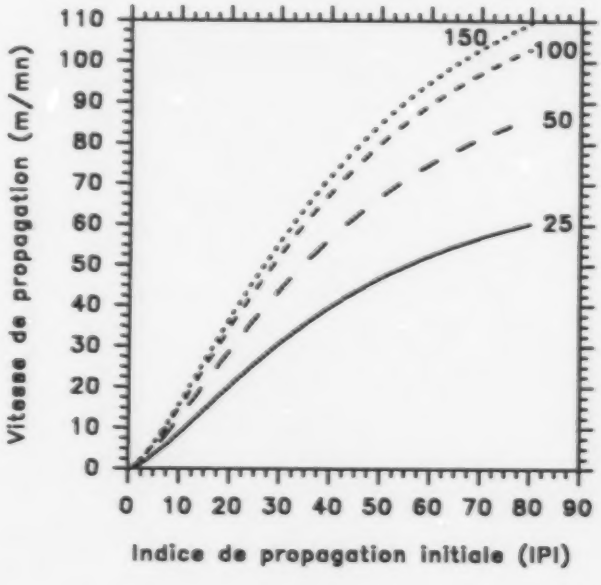
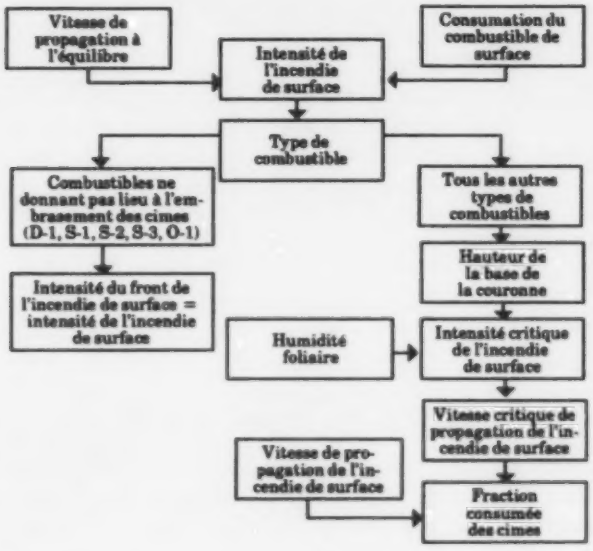


Figure 14. Effet de l'ICD sur la vitesse de propagation du feu dans un combustible de type C-2.

l'effet de diverses valeurs de l'ICD sur la vitesse de propagation prédite de l'incendie dans une pessière boréale (C-2).

7.2.4 Effet du feu de cimes sur la vitesse de propagation



Sous-programme « feu de cimes »

7.2.4.1 Transition entre l'incendie de surface et le feu de cimes

Vient un point où, avec l'augmentation de la vitesse de propagation, les cimes prennent feu. Van Wagner (1977b) a défini ce point comme l'intensité critique de l'incendie de surface (*ICS*), qui dépend de la hauteur de la base de la couronne (*HBC*) (hauteur au-dessus du sol où commence la couronne vivante) et de l'humidité foliaire (*HF*), comme suit :

$$ICS = 0{,}001 \times HBC^{1,5} \times (460 + 25{,}9 \times HF)^{1,5} \qquad (56)$$

L'intensité critique de l'incendie de surface ayant été calculée, elle peut être comparée à l'intensité prédite. Si l'intensité prédite est inférieure à l'intensité critique, l'incendie est classé comme incendie de surface; si l'intensité prédite est supérieure à la valeur critique, on pose alors par hypothèse que les cimes s'enflammeront, et le calcul passe à l'étape suivante afin de déterminer ce degré d'inflammation. L'intensité prévue de l'incendie de surface se calcule de la façon décrite au à la section 7.4; plus précisément, l'équation [69] permet de remplacer la vitesse finale de propagation (V_p) par la vitesse de propagation du feu de surface (après correction de l'*ICD*); la consumation du combustible de surface, calculée conformément à la section 7.1, remplace la consumation totale du combustible (*CTC*).

Tableau 8. Hauteur de la base de la couronne (*HBC*) et quantité de combustible dans les cimes (*QCC*) pour les combustibles donnant lieu aux feux de cimes

Type de combustible	*HBC* (m)	*QCC* (kg/m²)
C-1	2	0,75
C-2	3	0,80
C-3	8	1,15
C-4	4	1,20
C-5	18	1,20
C-6	7	1,80
C-7	10	0,50
M-1	6	0,80
M-2	6	0,80
M-3	6	0,80
M-4	6	0,80

La hauteur de la base de la couronne détermine le critère d'inflammation des cimes; toutefois, la théorie sur laquelle repose ce critère dépend elle-même de données empiriques pour sa forme quantitative finale. La hauteur de la base de la couronne affectée à chaque type de combustible est donc d'une certaine façon empirique. Même si la description de chaque type de combustible donne une indication de cette hauteur, la valeur affectée à chaque type de combustible devait correspondre à l'allure générale du phénomène d'inflammation des cimes. Les valeurs finales attribuées à cettte hauteur représentent dans la mesure du possible la structure réelle de la forêt (tableau 8).

La Méthode PCI prévoit une transition graduelle entre l'incendie de surface et le feu de cimes. Cette transition trouve deux explications. D'abord, la vitesse du vent selon la Méthode de l'IFM représente une moyenne, sans indication de la variabilité. Or, dans les faits, elle varie considérablement autour de sa valeur moyenne. Ceci porte à croire que, à l'intérieur d'une certaine gamme de vitesses moyennes du vent, l'incendie devrait successivement se propager en surface, durant les accalmies du vent et se propager aux cimes durant les coups de vent. Sa propagation serait alors intermédiaire en vitesse entre celle d'un incendie de surface et d'un feu de cimes. Deuxièmement, compte tenu de la variabilité interne de certains types de combustibles, il convient davantage de prédire le degré d'inflammation des cimes plutôt que de préciser si chaque incendie est de surface ou de cimes.

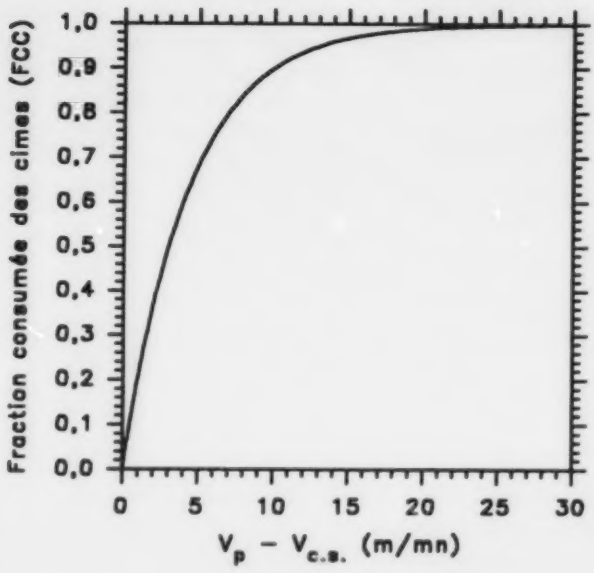


Figure 15. Fonction de la transition (fraction consumée des cimes) déterminant le degré de consumation des cimes. (V_p : vitesse de propagation de l'incendie de surface; $V_{c.s.}$ vitesse critique de propagation de l'incendie de surface).

Par hypothèse, on a posé que le degré d'inflammation des cimes dépendait du degré par lequel l'intensité prédite de l'incendie de surface excédait l'intensité critique. Mais il est plus facile d'utiliser la vitesse de propagation que l'intensité de l'incendie. Le degré d'inflammation des cimes dépend donc de l'excédent de la vitesse prédite de la propagation de l'incendie en surface sur la vitesse de propagation associée à l'intensité critique de l'incendie de surface. On a choisi l'échelle de la fonction de transition pour que 90 % des cimes aient pris feu lorsque la vitesse de propagation de l'incendie en surface dépasse de 10 m/mn la vitesse critique de propagation en surface (figure 15).

On détermine la vitesse critique de propagation de l'incendie de surface ($V_{c.s.}$) en remplaçant l'intensité de l'incendie de surface par l'intensité critique de l'incendie de surface et en travaillant à rebours, comme suit :

$$V_{c.s.} = \frac{ICS}{300 \times CCS} \qquad (57)$$

où *ICS* est l'intensité critique de l'incendie de surface et *CCS* la consumation du combustible de surface. La fonction de transition, décrivant la fraction consumée des cimes (*FCC*), devient alors :

$$FCC = 1 - e^{-0{,}23 \times (V_p - V_{c.s.})} \qquad (58)$$

où V_p est la vitesse prédite de propagation (m/mn) et $V_{c.s.}$ la vitesse critique de propagation de l'incendie de surface. La fraction consumée des cimes intervient dans la détermination de la vitesse résultante de propagation du feu de cimes dans les plantations de conifères (section 7.2.5.2, équation [65]) et de la fraction de combustible consumé dans les cimes (section 7.3), ce qui finit par donner l'intensité du front de l'incendie.

7.2.5 Plantation de conifères — combustible C-6

Les plantations de conifères sont plus structurées et sont moins variables que les forêts naturellement régénérées et elles sont plus faciles à modéliser quand on a affaire à une séparation complexe des incendies de surface et des feux de cimes. Les paramètres du complexe de combustibles tendent à être moins variables à l'intérieur des peuplements et à exercer une influence prédictible sur les caractéristiques du comportement de l'incendie. Cette structure bien définie et cette faible variabilité des paramètres ont permis de construire un modèle rigoureux à deux équations afin de prédire la propagation de l'incendie dans ces plantations. Idéalement, on suppose que la vitesse de propagation de l'incendie dans un peuplement de conifères peut être visualisée mathématiquement comme un point dans l'espace entre deux courbes limitant la vitesse de propagation. La courbe inférieure représenterait un incendie pur de surface, qui ne prend pas aux cimes, tandis que la courbe supérieure représenterait un incendie qui s'attaque totalement aux cimes. L'emplacement du point entre ces deux courbes serait déterminé par la comparaison de l'intensité prédite de l'incendie de surface relativement à l'intensité critique, nécessaire à l'inflammation des cimes. La détermination de la vitesse finale de propagation est mieux décrite avec l'aide d'un diagramme.

Dans la figure 16, la courbe inférieure représente tous les incendies de surface possibles, la courbe supérieure l'incendie qui s'attaque à toute la cime. Évidemment, la branche de droite de la courbe de l'incendie de surface et la branche de gauche de la courbe du feu de cimes ne sont jamais utilisées, mais il existe une zone centrale de recouvrement horizontal selon les effets secondaires de l'*ICD* (section 7.2.3) et l'humidité foliaire.

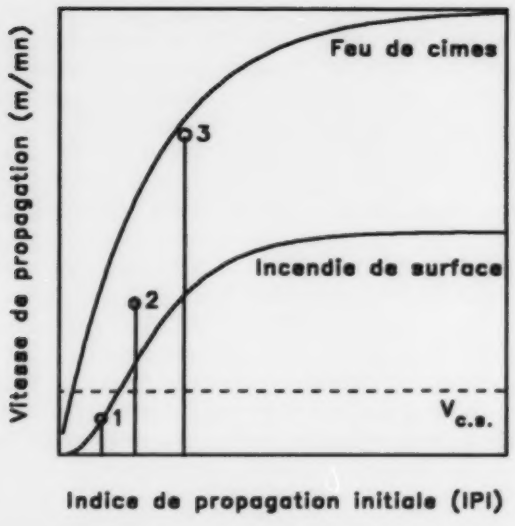


Figure 16. Modèle à deux équations de la vitesse de propagation de l'incendie dans le combustible C-6 (types d'incendies : 1, de surface, 2, intermittent de cimes; 3, continu de cimes).

7.2.5.1 Effet de l'humidité foliaire sur la propagation du feu de cimes

L'humidité foliaire a déjà été invoquée comme facteur de la transition de l'incendie de surface au feu de cimes. Logiquement, elle doit également influer sur la vitesse de propagation de l'incendie dans la strate des cimes. Comme le comportement de l'humidité foliaire dans les forêts de conifères du Canada se révèle fortement saisonnier (Voir section 6.0), des valeurs basses étant nettement distinguées au printemps, on en déduit que les feux de cimes se déclareraient plus facilement et se propageraient plus rapidement au cours de cette saison. Encore une fois, à l'instar de l'effet d'accumulation de l'*ICD*, l'analyse des données sur les incendies dans la base de données de la Méthode PCI n'a pas donné de preuve statistique pour étayer la réalité de cet effet. On a donc appliqué l'argument physique adapté pour les feux de cimes par Van Wagner (1974b) à partir des arguments originaux de Thomas et collab. (1964), que la vitesse de propagation devrait être a) proportionnelle au flux horizontal de chaleur radiante au travers de la strate des cimes; b) inversement proportionnelle à l'énergie d'inflammation du feuillage; c) inversement proportionnelle à la densité apparente du feuillage.

L'effet de la variation saisonnière de la densité apparente du feuillage a été omis, dans un souci de simplicité, ce qui fait que l'on ne tient compte que des deux premiers effets. Il fallait d'abord exprimer la température T de la flamme dans les cimes et la chaleur d'inflammation h, en relation avec l'humidité foliaire. La température est bien exprimée par l'équation suivante :

$$T = 1\,500 - 2{,}75 \times HF \qquad (59)$$

où T est la température de la flamme dans les cimes (en kelvins), et HF est l'humidité foliaire, selon l'hypothèse d'un apport d'air deux fois supérieur à ce qui est nécessaire pour une combustion parfaite (Van Wagner, rapport inédit), tandis que le deuxième paramètre était bien exprimé par l'équation suivante :

$$h = 460 + 25{,}9 \times HF \qquad (60)$$

où h est la chaleur d'inflammation (en kJ/kg), d'après Van Wagner (1977b)[1]. En appliquant la loi de la quatrième puissance du rayonnement thermique de Boltzmann et en réglant les virgules décimales pour obtenir des chiffres maniables, l'effet de l'humidité foliaire (*EHF*) est donné par la relation suivante :

$$EHF = \frac{(1{,}5 - 0{,}00275 \times HF)^{4.0}}{460 + (25{,}9 \times HF)} \times 1000 \qquad (61)$$

L'effet de l'humidité foliaire s'applique toujours relativement à une valeur normalisée de ce paramètre, fondée sur l'humidité foliaire moyenne hypothétique (soit 97 %) observée dans l'ensemble de données composites sur les feux de cimes. Une constante de proportionnalité n'est donc pas nécessaire. La valeur normalisée de l'effet de l'humidité foliaire est de 0,778. Dans la pratique, l'effet de l'humidité foliaire varie de 0,966 à 0,525, à l'intérieur de l'intervalle normalisé de l'humidité foliaire qui va de 85 à 120 %.

7.2.5.2 Vitesse de propagation de l'incendie dans une plantation de conifères

Les équations ont été construites pour les 12 incendies décrits dans l'ensemble de données sur le combustible C-6, qui recouvre une large gamme de comportements, qui vont du feu de surface tranquille à l'embrasement complet des cimes. Des réglages

1. Dans l'équation (60), 25,9 était à l'origine 26 (Van Wagner, 1977b).

subjectifs ont dû être apportés pour que les résultats correspondent le plus possible aux données. Les équations de la vitesse de propagation de l'incendie de surface en deux étapes et de la vitesse de propagation du feu de cimes en une sont les suivantes :

$$V_{i.p.} = 30 \times \left(1 - e^{-0{,}08 \times IPI}\right)^{3{,}0} \quad (62)$$

$$V_{p.s.} = V_{i.p.} \times EA \quad (63)$$

$$V_{f.c.} = 60 \times \left(1 - e^{-0{,}0497 \times IPI}\right)^{1{,}00} \times \frac{EHF}{EHF_{moy.}} \quad (64)$$

où $V_{i.p.}$ est la vitesse intermédiaire de propagation de l'incendie de surface; *IPI*, l'indice de propagation initiale; $V_{p.s.}$, la vitesse de propagation de l'incendie de surface (m/mn); *EA*, l'effet d'accumulation (section 7.2.3); $V_{f.c.}$, la vitesse de propagation du feu de cimes (m/mn); *EHF*, l'effet de l'humidité foliaire (section 7.2.5.1); et $EHF_{moy.}$ égale 0,778.

Le tireté horizontal de la figure 16 représente la vitesse critique de propagation à laquelle se déclare le feu de cimes ($V_{c.s.}$). La fraction consumée des cimes (*FCC*) est d'abord calculée (section 7.2.4.1) à partir de la différence entre la vitesse prédite de propagation de l'incendie de surface et la vitesse critique de propagation à laquelle se déclare le feu de cimes. La vitesse finale résultante de propagation (V_p) est ensuite trouvée à partir de la relation suivante :

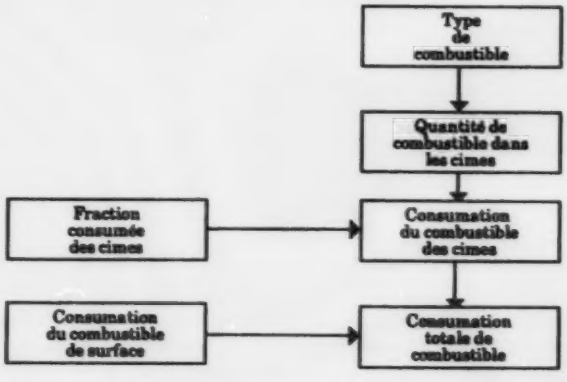
$$V_p = V_{p.s.} + FCC \times (V_{f.c.} - V_{p.s.}) \quad (65)$$

Le degré par lequel la vitesse finale prédite de propagation excède la vitesse de propagation de l'incendie de surface dépend donc du degré par lequel la vitesse de propagation de l'incendie de surface excède la vitesse critique de propagation de l'incendie qui allume le feu de cimes; la fonction intermédiaire est celle qui décrit la fraction brûlée des cimes. Ce dernier facteur est également appliqué à la quantité de combustible dans les cimes pour obtenir la consumation prévue du combustible des cimes. L'intensité du front de l'incendie peut ensuite être déterminée à partir de la vitesse finale de propagation et de la consumation totale de combustible (somme de la consumation du combustible de surface et du combustible dans les cimes).

Les feux de cimes occupent une bande qui, sur le graphique, part, vers la droite, de la région où la vitesse de propagation de l'incendie de surface commence à dépasser la vitesse critique de propagation pour l'allumage des cimes, pour rencontrer la courbe de la vitesse de propagation du feu de cimes à un *IPI* suffisamment élevé pour que toutes les cimes s'embrasent. Trois exemples sont donnés à la figure 16. L'*IPI* au point 1 se traduit par une vitesse de propagation en surface qui est inférieure à la vitesse critique pour l'allumage des cimes; le feu se cantonne donc à la surface. Au point 2, l'*IPI* se traduit par une vitesse de propagation en surface qui excède la vitesse critique pour l'inflammation des cimes, de sorte que l'incendie se propage aux cimes; la fraction consumée des cimes est appréciable, mais elle n'est pas totale ou, encore, la combustion des cimes est intermittente. Au point 3, l'*IPI* se traduit par une vitesse de propagation de l'incendie en surface suffisamment élevée pour que la fraction consumée des cimes soit presque l'unité et que l'incendie se propage presque à la valeur de la vitesse de propagation des feux de cimes ($V_{f.c.}$).

La souplesse du modèle à deux équations permet de faire varier le facteur de la base de la couronne, lequel dépend de la hauteur du peuplement. Si l'on possède des renseignements précis sur la hauteur de la base de la couronne, on peut s'en servir. En outre, le modèle à deux équations intègre deux types de combustibles et deux modèles de propagation. La plantation de conifères (C-6) est le seul type de combustible qui autorise cette fusion à cause de la séparation nette entre les strates des combustibles, surface et cimes.

7.3 Consumation finale



Consumation finale

À la section 7.1, on a calculé la consumation du combustible de surface pour tous les types de combustibles. S'il est déterminé que les cimes prennent feu, il faut additionner la consumation des cimes et celle du combustible de surface pour arriver à la comsumation totale. Si, toutefois, l'incendie est classé comme incendie de surface, alors la consumation du combustible de surface devient la consumation totale et il n'est pas nécessaire de poursuivre le calcul.

Si l'incendie est classé comme feu de cimes, la fraction consumée des cimes sera supérieure à zéro. Pour déterminer la consumation des cimes, on multiplie la fraction consumée des cimes (section 7.2.4.1) par la quantité de combustible dans les cimes. Les quantités correspondant aux combustibles susceptibles de prendre feu sont données au tableau 8. Ainsi, pour calculer la consumation totale, on se sert des équations suivantes :

$$CC = QCC \times FCC \tag{66}$$

$$CTC = CCS + CC \tag{67}$$

où CC est la consumation des cimes (kg/m²); QCC, la quantité de combustible dans les cimes (kg/m²); FCC, la fraction consumée des cimes; CTC, la consumation totale de combustible (kg/m²); et CCS, la consumation de combustible de surface (kg/m²). Pour les forêts mixtes M-1 et M-2, on multiplie la consumation du combustible des cimes par un coefficient (% C/100 où % C est le pourcentage de conifères) pour tenir compte de la proportion de conifères dans le peuplement.

7.4 Intensité du front de l'incendie

Calcul de l'intensité du front de l'incendie

L'intensité de l'incendie (dite également intensité du front de l'incendie ou de la ligne de feu) est devenue l'un des étalons par lesquels les chefs de la lutte estiment la difficulté de leur tâche et sélectionnent les mesures convenables d'extinction. À l'origine, Byram (1959) a défini l'intensité de l'incendie comme suit :

$$I = HwR \tag{68}$$

où I est l'intensité de l'incendie (kW/m); H est le pouvoir calorifique inférieur du combustible (kJ/kg); w est la masse de combustible consumée par unité de surface sur le front de l'incendie (kg/m²); et R est la vitesse d'avance (m/s). L'équation [68] de Byram permet de calculer l'énergie dégagée par unité de temps à partir de la chaleur dégagée par la masse de combustible consumée et la vitesse d'avance (propagation). Van Wagner (1977d) fait observer que l'intensité ainsi exprimée renferme à peu près autant d'information sur le comportement du feu qu'il est possible d'en condenser en un seul chiffre. Au Canada, l'intensité de l'incendie est considérée comme la vitesse de dégagement d'énergie calorifique par unité de temps et par unité de longueur du front d'incendie (Merrill et Alexander, 1987).

Afin de prédire l'intensité de l'incendie, la Méthode PCI utilise l'équation d'origine de Byram (1959) en utilisant la vitesse prédite de propagation du front de l'incendie pour R, la consumation prédite totale de combustible (CTC) pour w et la constante normale de 18 000 kJ/kg pour le pouvoir calorifique (H). La vitesse de propagation du front est soit la vitesse de propagation finale de l'incendie de surface, soit la vitesse de propagation finale du feu de cimes, selon le type d'incendie. Lorsque les chiffres montrent que les cimes sont enflammées, la valeur de la consumation, utilisée dans l'équation de l'intensité du front de l'incendie, traduira la consumation supplémentaire imputable aux cimes. De fait, l'équation [68] est transformée, par la Méthode PCI, en l'équation suivante :

$$II = 300 \times CC \times V_p \tag{69}$$

où II est l'intensité prédite de l'incendie (kW/m); CC, la consumation prédite de combustible (de surface ou totale) (kg/m²); V_p, la vitesse prédite de propagation (m/mn). À noter que la constante de 18 000 kJ/kg a été divisée par 60, pour exprimer V_p en mètres/seconde au lieu de mètres/minute.

L'intensité du feu, dans la Méthode PCI est calculée à partir de la consumation totale. Pour les calculs, on n'a pas tenté d'exclure le combustible qui peut avoir été consumé par combustion lente après le passage du front de l'incendie.

7.5 Description de l'incendie

Dans l'édition provisoire de la Méthode PCI, l'incendie était classé soit comme incendie de surface, soit comme feu de cimes. Toutefois, on peut le mieux visualiser son comportement comme quelque chose de variable dans le temps et dans l'espace en raison des variations normales du vent et du combustible, comme il en a été question à la section 7.2.4.1. On a estimé qu'il était plus réaliste de prédire le degré de consumation des cimes plutôt que d'essayer de déterminer si chaque incendie était tout simplement de surface ou de cimes. Dans la Méthode PCI, le type d'incendie a été remplacé par la description de l'incendie, fondée sur la fraction des cimes consumée (*FCC*). Si nous augmentons lentement l'intensité de l'incendie (et par conséquent le degré de consumation des cimes) selon un intervalle qui va de l'incendie de surface jusqu'à l'incendie qui embrase toutes la cime, nous pouvons imaginer un nombre indéterminé de paliers intermédiaires. Il y a donc une large gamme de types possibles de feux de cimes, qui vont de la combustion d'un seul arbre qui flambe en chandelle jusqu'au véritable mur de feu qui embrase toute la forêt.

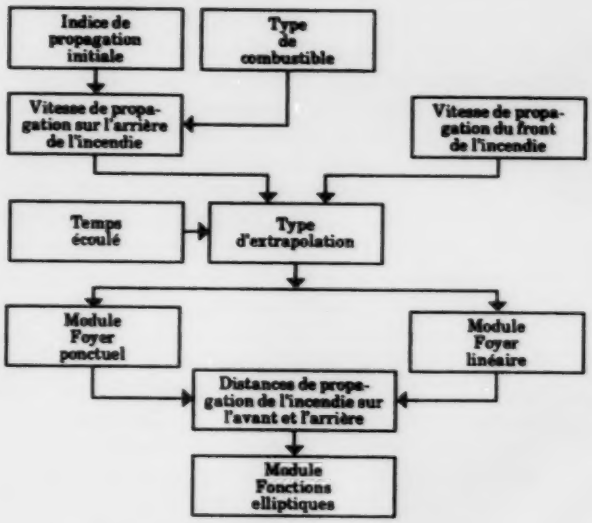
La fraction consumée des cimes varie de 0,0 (incendie de surface qui épargne les cimes) à 1,0 (toutes les cimes étant complètement embrasées). Cet intervalle peut être ventilé selon les catégories suivantes :

Fraction consumée des cimes	Type d'incendie
<0,1	de surface
0,1 à 0,89	intermittent de cimes
>0,9	continu de cimes

Les limites des fractions consumées des cimes et les catégories descriptives des incendies reposent sur l'hypothèse que lorsque moins de 10 % des arbres flambent en chandelle, l'incendie peut être considérée comme de surface.

Les valeurs de la fraction consumée des cimes peuvent également être interprétées sans l'aide de classification descriptive et elles peuvent être citées directement pour décrire le degré de consumation des cimes. Cela exige quelque expérience pour ce qui concerne la valeur de la fraction consumée des cimes et le comportement résultant de l'incendie. Toutefois, la fraction consumée des cimes peut devenir un moyen utile pour décrire les incendies.

8.0 Composantes secondaires

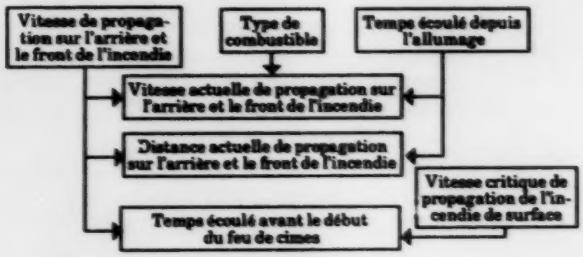


Composantes secondaires de la Méthode PCI

Les composantes secondaires de la Méthode PCI englobent les modèles de croissance de l'incendie et d'extrapolation de celle-ci. Le modèle de croissance elliptique (Van Wagner, 1969; Alexander, 1985) dont s'est inspirée la version provisoire de la méthode PCI, est élargie dans son application pour fournir plus de renseignements. Ce modèle a subi deux révisions majeures et plusieurs mineures. Les révisions majeures sont l'addition d'une fonction d'accélération pour les incendies qui ont une origine ponctuelle ainsi qu'une nouvelle méthode de calcul du rapport de la longueur à la largeur. Il s'ensuit que la Méthode PCI est plus précise et qu'elle s'est enrichie de composantes de sortie supplémentaires.

Deux types d'extrapolation de la croissance des incendies peuvent être effectués grâce à la Méthode PCI : une extrapolation à partir d'un foyer ponctuel appliquant un modèle de croissance elliptique et un modèle d'accélération pour définir les distances de propagation du front, des flancs et de l'arrière de l'incendie, l'aire brûlée, le périmètre de l'incendie et la croissance de ce périmètre; et une extrapolation simple à partir d'un foyer linéaire, fondée sur la vitesse de propagation prédite du front de l'incendie et sur un délai donné (temps écoulé), afin de calculer l'emplacement du front de l'incendie quelque part dans l'avenir. La première étape dans l'extrapolation à partir d'un foyer ponctuel est de prévoir une période d'accélération à partir du moment où l'incendie se déclare jusqu'au moment où la vitesse de propagation à l'équilibre a été atteinte.

8.1 Extrapolation de la croissance de l'incendie à partir d'un foyer ponctuel; accélération



Croissance d'un incendie à foyer ponctuel

Avec l'arrivée de dispositifs plus efficaces de détection, l'incendie est souvent décelé presque immédiatement après qu'il éclate. Évidemment, un feu qui vient tout juste de s'allumer n'aura pas atteint la vitesse de propagation à l'équilibre prédite par la Méthode PCI. La difficulté de déterminer le temps que prend l'incendie pour atteindre cette vitesse à l'équilibre est compliquée par l'intervention de nombreuses variables. Idéalement, dans un combustible homogène sans solution de continuité ne subissant pas l'influence de la topographie ni modification météorologique ni variation de l'humidité, l'incendie s'accélérera doucement au cours d'une période prédictible de temps. Toutefois, dans les peuplements forestiers, un foyer ponctuel peut manquer de l'intensité qui suffirait à donner le type d'incendie à l'équilibre vers lequel pourrait évoluer un incendie à foyer linéaire. L'intensité inférieure du foyer ponctuel provient surtout de la lenteur du vent à l'intérieur du peuplement relativement aux vitesses du vent observées au-dessus de la forêt. Par exemple, les jeunes peuplements de pins gris qui trouvent leur origine dans un incendie antérieur sont extrêmement denses, ce qui fait que la vitesse du vent près du sol est très inférieure à la vitesse du vent au-dessus du couvert forestier. Les foyers ponctuels exposés de ce fait à de faibles vents possèdent donc une vitesse de propagation et une intensité inférieures. Ces incendies peu intenses peuvent ne pas pouvoir se communiquer aux cimes (et ainsi ne pas profiter du vent au-dessus du couvert), tandis qu'un foyer linéaire, en profitant de l'exposition complète au vent, peut acquérir une vitesse de propagation et une intensité plus fortes dans exactement les mêmes conditions météorologiques et en présence du même combustible.

Les deux vitesses de propagation à l'équilibre (l'une pour un foyer ponctuel et l'autre pour un foyer linéaire) peuvent aboutir à une vitesse de propagation à double équilibre : deux incendies brûlant exactement le même combustible, dans les mêmes conditions météorologiques et topographiques, peuvent se comporter différemment. Les deux types sont identiques sauf que l'incendie dont le foyer est ponctuel subit l'influence du vent sous le couvert, tandis que l'incendie dont le foyer est linéaire subit l'influence du champ du vent au-dessus du couvert. Un foyer ponctuel de surface pourrait rapidement se transformer en feu de cimes si le combustible est discontinu (ce qui permet au vent d'entrer en action). Une fois pris, le feu de cimes peut s'entretenir lui-même grâce aux vitesses supérieures du vent au-dessus du couvert forestier.

La Méthode PCI ne permet de prédire qu'une seule vitesse de propagation à l'équilibre — le pire scénario ou celui d'un incendie à foyer linéaire, selon le combustible donné et les conditions météorologiques existantes. Dans ce cas, l'organisme de lutte contre les incendies pourrait réagir à outrance à un rapport signalant le début d'un incendie. Les pompiers accourus sur les lieux pourraient trouver un petit foyer plutôt que l'intense feu de cimes prévu. Dans ces cas, l'incendie, qui se trouve encore au stade d'incendie de surface, est instable. Si les bonnes conditions de répartition du combustible avaient été réunies, les pompiers auraient trouvé un foyer très différent.

La prédiction du moment où un feu passe de la vitesse inférieure de propagation à l'équilibre à une vitesse supérieure est un problème de probabilités. Les probabilités dépendent des caractéristiques locales du combustible (taille, quantité et répartition des trouées du couvert), de la topographie locale (petites collines et crêtes) ainsi que des conditions météorologiques localisées (exposition au soleil, heure du jour, vitesse du vent et variation de sa direction). Ce type de prédiction probabiliste dépend de la répartition locale du combustible ainsi que des détails topographiques. Ce degré de finesse dépasse les possibilités de la Méthode PCI.

Le délai exigé pour qu'un foyer ponctuel atteigne la vitesse de propagation à l'équilibre continue de faire problème. Pour le calculer, il faut poser deux hypothèses : (1) que le combustible est continu et homogène et que l'intensité de l'incendie s'accélère doucement dans le combustible jusqu'à atteindre une vitesse finale prédite de propagation; (2) que le problème du double équilibre peut être ignoré dans les combustibles constituant des couverts fermés. Dans le cas de combustibles à couverts ouverts, le problème ne se pose pas, car le champ de vents en place atteint sans encombre le niveau du sol. Même si le problème du double équilibre n'est pas attaqué de front en termes probabilistes pour les couverts fermés, on en tient

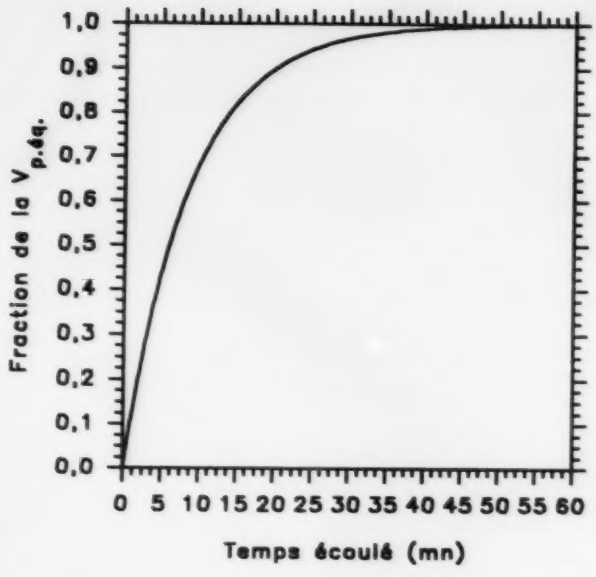


Figure 17. Modèle d'accélération de l'incendie dans un combustible ouvert.

compte jusqu'à un certain point dans la Méthode PCI (par la modification du temps écoulé avant l'équilibre).

Les données expérimentales dont on dispose (collectées en laboratoire et sur le terrain) à l'égard des combustibles ouverts montrent que le temps pris pour atteindre la vitesse de propagation à l'équilibre à partir du foyer ponctuel est constant, quelles que soient les conditions météorologiques. Ce temps varie entre 10 et 40 minutes, pour une moyenne de 20 minutes, dans un couvert ouvert (C-1, O-1, S-1, S-2, S-3). La forme de la courbe d'accélération qui corrèle la vitesse de propagation au temps écoulé depuis l'allumage a été discutée par plusieurs auteurs (McArthur, 1968; Cheney et Barry, 1969; Luke et McArthur, 1986; McAlpine, 1988; Weber, 1989; C.E. Van Wagner, 1985, dossier nº PI-4-20 du gouvernement canadien, communication personnelle). On s'accorde généralement sur la justesse d'une courbe exponentielle négative (voir par exemple la figure 17). Une forme d'équation a été choisie pour permettre l'intégration mathématique facile afin de déterminer la distance de propagation du front de l'incendie en tout temps depuis l'allumage. Les deux équations ci-dessous reposent sur l'hypothèse d'un temps écoulé de 20 minutes pour atteindre 90 % de la vitesse de propagation à l'équilibre :

$$V_{p.t.} = V_{p.éq.} \times \left(1 - e^{-at}\right) \qquad (70)$$

$$D = V_{p.éq.} \times \left(t + \frac{e^{-at}}{a} - \frac{1}{a}\right) \qquad (71)$$

où $V_{p.t.}$ est la vitesse de propagation au moment t (m/mn); $V_{p.éq.}$, la vitesse de propagation prédite à l'équilibre (m/mn); t, le temps écoulé (mn); a, une constante, égale à 0,115, dans l'hypothèse qu'il faut 20 minutes pour atteindre 90 % de $V_{p.éq.}$; D, la distance de propagation du front (m).

Ainsi est résolu le problème posé par les combustibles constituant des couverts ouverts. Les couverts fermés, qui sont sous l'influence du problème du double équilibre, se comportent un peu différemment. Les données recueillies sur le terrain à leur égard portent à croire à la nécessité d'un délai plus long pour atteindre l'équilibre (au moins le double du délai nécessaire sous les couverts ouverts) et à plus de variabilité dans ces délais. Le temps nécessaire pour que l'incendie atteigne la vitesse de propagation à l'équilibre a été fixé entre 20 à 75 minutes, selon le degré d'embrasement des cimes (mesuré par le paramètre *FCC* ou fraction consumée des cimes). Cette méthode de calcul prévoit l'atteinte de l'équilibre en 20 minutes (comme dans les couverts ouverts) parce que le feu de surface n'interagirait qu'avec le vent dans le peuplement. À mesure que la vitesse prédite de propagation augmente jusqu'à entraîner l'inflammation de toute les cimes, un délai progressivement plus long est accordé, pour compenser l'écart entre la vitesse du vent au-dessus des cimes et la vitesse du vent à l'intérieur du peuplement. La période d'accélération est ainsi liée à la vitesse d'augmentation de l'intensité de l'incendie. Les principes probabilistes peuvent également s'appliquer au délai plus long exigé pour que les cimes prennent feu : plus le feu se propage longtemps au sol, plus il est probable qu'il arrivera à une solution de continuité dans le combustible et qu'il se propagera aux cimes. La valeur a des équations [70] et [71] relatives aux combustibles des couverts fermés est calculée par l'équation [72], comme suit :

$$a = 0{,}115 - 18{,}8 \times FCC^{2,5} \times e^{(-8 \times FCC)} \qquad (72)$$

où a est la constante remplaçant 0,115 dans les équations [70] et [71], tandis que *FCC* est la fraction consumée des cimes.

La période d'accélération maximale découlant de la combinaison des équations [70] et [72] ne survient pas lorsque toutes les cimes sont en feu, mais plutôt à une valeur intermédiaire de la variable *FCC*. Lorsque l'intensité potentielle de l'incendie de surface est suffisamment élevée pour embraser toutes les cimes,

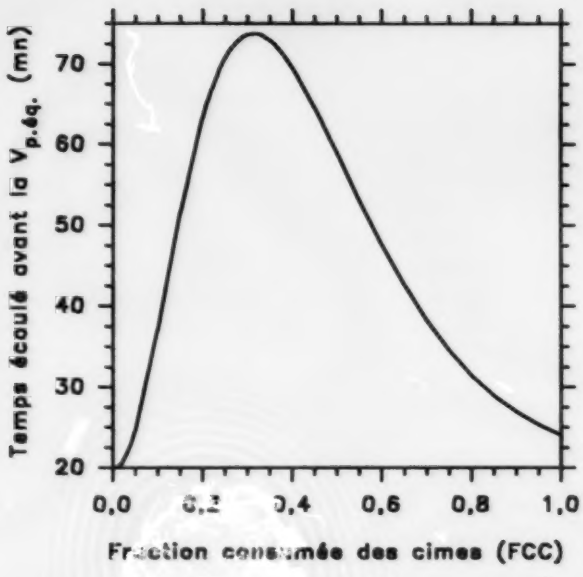


Figure 18. Temps écoulé avant la vitesse de propagation à l'équilibre ($V_{p.éq.}$) en fonction de la fraction consumée des cimes dans les couverts fermés.

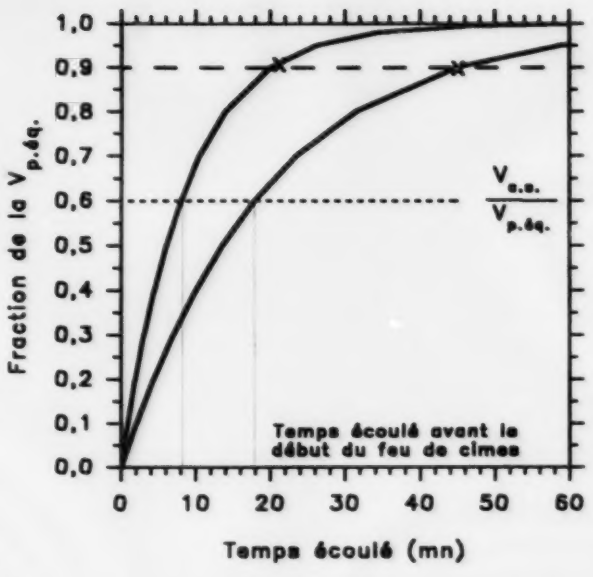


Figure 19. Modèle d'accélération sous couvert fermé. Les courbes représentent deux possibilités de la fonction d'accélération.

le début de l'inflammation des cimes est possible bien avant que l'accélération n'ait atteint son terme. Un feu allumé dans ces conditions pourrait atteindre rapidement une intensité suffisante pour embraser les cimes et pour entreprendre son accélération sous forme de foyer ponctuel dans l'étage des cimes. Le feu de cimes se comporterait alors passablement de la même façon que l'incendie qui prendrait son accélération dans des conditions d'exposition totale au vent. L'équation [72] reproduit à peu près ce comportement en fixant le temps écoulé pour atteindre l'équilibre à un minimum, aux valeurs faible et élevée de la fraction consumée des cimes, tandis que le temps maximal pour atteindre la propagation à l'équilibre se situe à une valeur intermédiaire (figure 18).

Comme nous posons par hypothèse que l'incendie s'accélérera de façon prédictible, suivant une courbe semblable à celle de la figure 17, nous pouvons définir le temps écoulé avant que le feu commence à prendre dans les cimes, ou, lorsque le feu de surface a atteint une intensité suffisante, pour qu'il se propage aux cimes. Cette valeur n'est pas immuable en raison du double équilibre évoqué précédemment, mais elle donne une bonne estimation préliminaire pour les interventions sur le terrain. On peut également se représenter le temps écoulé avant que débute le feu de cimes comme le temps requis pour que l'incendie de surface devienne instable et pour que, selon la continuité locale du combustible disponible, il puisse se propager aux cimes. L'équation [73] définit $T_é$, le temps écoulé avant que le feu ne se propage aux cimes :

$$T_é = \frac{\ln\left(1 - \frac{V_{c.s.}}{V_p}\right)}{-a} \qquad (73)$$

où $V_{c.s.}$ est la vitesse critique de propagation pour l'embrasement des cimes; V_p, la vitesse prédite de propagation à l'équilibre. La figure 19 représente le modèle général d'incendie sous couvert fermé, avec les deux courbes d'accélération et le temps écoulé qui correspond à ces courbes pour le début du feu de cimes (selon le rapport $V_{c.s.}/V_p$ de l'équation [73]).

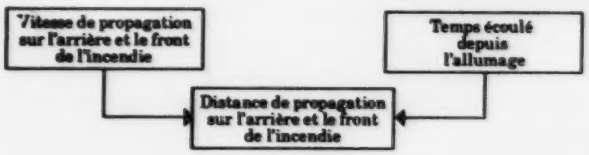
Le rapport entre la vitesse critique de propagation de l'incendie de surface et la vitesse prédite de propagation ($V_{c.s.}/V_p$) décrit l'excédent par rapport à la vitesse critique de propagation prédite. Plus les conditions sont intenses, moins le rapport est élevé et plus le temps écoulé avant le feu de cimes est court. Réciproquement, plus la vitesse prédite de propagation approche de la vitesse critique de propagation, plus il faut de temps avant que les cimes ne prennent feu. La figure 19 montre clairement que lorsque le rapport de $V_{c.s.}/V_p$ dépasse 0,9 (embrasement minimal des cimes), le temps écoulé avant le début du feu de

cimes peut devenir excessivement long.[1] Cela provient de la nature asymptotique des courbes d'accélération et peut être corrigé en fixant la valeur du rapport $V_{c.s.}/V_p$ à 0,9 lorsque, ce rapport dépasse 0,9.

Le choix du modèle d'accélération, pour couvert fermé ou pour couvert ouvert, est normalement simple. Toutefois, certains types de couverts locaux définis comme fermés sont en fait ouverts, en raison de la composition du peuplement. Un exemple serait la pessière à épinettes noires des basses terres (habituellement considérée comme du type C-2, à couvert fermé), observée dans le nord de l'Alberta et de la Saskatchewan ainsi que les Territoires du Nord-Ouest. Ce complexe particulier de combustible peut être considéré comme un mélange des types C-1 et C-2. Il serait alors préférable d'utiliser le modèle d'accélération pour couvert ouvert, afin de rendre compte de l'accélération rapide des incendies qui ont été observés par le passé dans ces milieux. Un autre exemple serait le combustible de type C-7 (pins ponderosas et douglas taxifoliés).

Le modèle d'accélération présenté aux équations [70] à [73] peut servir pour tout feu à ses débuts afin de déterminer sa vitesse de propagation en tout temps (équation [70]), la distance de propagation du front (équation [71]) et enfin, le temps écoulé avant l'embrasement des cimes (équation [73]).

8.2 Extrapolation de la croissance des foyers linéaires



Croissance d'un incendie à foyer linéaire

L'extrapolation de la croissance d'un foyer linéaire est beaucoup plus simple que la détermination de l'accélération d'un foyer ponctuel. Pour l'extrapolation d'une ligne de feu sur le front de l'incendie, la distance de propagation en mètres de ce dernier (D_f) se calcule comme suit :

$$D_f = V_p \times T \qquad (74)$$

où V_p est la vitesse de propagation à l'équilibre (m/mn); T, le temps écoulé (mn). Le modèle de croissance elliptique sert à calculer les vitesses de propagation sur les flancs et l'arrière de l'incendie.

8.3 Vitesse de propagation sur l'arrière de l'incendie

Dans le modèle simple de croissance elliptique de l'incendie, présenté dans l'édition provisoire de 1984 de la Méthode PCI, la propagation sur l'arrière de l'incendie a été considérée, à toutes fins utiles, comme négligeable. Cette hypothèse signifie que la propagation sur l'arrière est fixée à zéro et que la propagation du front de l'incendie équivaut à la longueur totale de l'axe majeur de l'ellipse qui circonscrit l'aire incendiée (section 8.4). Or, on aboutit ainsi à une sous-estimation prospective de la superficie elliptique et du périmètre de l'incendie, notamment lorsque le vent est très faible ou que le rapport de la longueur à la largeur est inférieur à environ 2,0 (Alexander, 1985). Dans les applications ultérieures du modèle elliptique, l'approche par foyers (Alexander, 1985) a été adoptée (par exemple McAlpine, 1986, 1987; Alexander et collab., 1988; Alexander et Lanoville, 1989) comme moyen d'expliquer indirectement la propagation de l'incendie sur l'arrière. Toutefois, cette nouvelle approche a, dans le cas de certains combustibles et dans certaines conditions météorologiques, abouti à des estimations erratiques de la propagation sur l'arrière de l'incendie. Cela était le résultat d'une interaction complexe entre les courbes de la vitesse de propagation et la courbe du rapport de la longueur à la largeur. Un modèle de la vitesse de propagation sur l'arrière de l'incendie a par la suite été construit à partir de l'expérience acquise en dehors des règles et de données limitées et au moyen d'un ensemble légèrement modifié d'équations faisant intervenir l'*IPI* (indice de propagation initiale), comme suit :

$$f(V_{i.a.}) = e^{-0{,}05039 \times V_{r.v.}} \qquad (75)$$

où $f(V)_{i.a.}$ est la fonction du vent sur l'arrière de l'incendie, et $V_{r.v.}$ la vitesse résultante du vent (vectorielle).

$$IPI_a = f(V_{i.a.}) \times f(ICL) \times 0{,}208 \qquad (76)$$

où IPI_a est l'*IPI* correspondant à la vitesse de propagation sur l'arrière de l'incendie et $f(ICL)$ la fonction de l'*ICL* pour l'équation [45] servant au calcul de l'*IPI*.

1. Cela survient lorsque l'embrasement des cimes est minimal. La vitesse critique de propagation en surface pour que le feu se propage aux cimes est plus de 90 % de la vitesse prédite de propagation.

$$V_{p.a.} = a \times \left(1 - e^{-b \times IPI_a}\right)^c \times EA \qquad (77)$$

où $V_{p.a.}$ est la vitesse de propagation sur l'arrière de l'incendie (m/mn); a, b et c, des constantes spécifiques du type de combustible (tableau 6); EA, l'effet d'accumulation (section 7.2.3). On obtient (en omettant momentanément l'effet d'accumulation) une courbe qui, par vent nul, fait que la vitesse sur l'arrière égale la vitesse de propagation du front de l'incendie, mais qui fait que la vitesse sur l'arrière dégénère en une vitesse de propagation presque constante lorsque la vitesse du vent augmente. On peut prédire les vitesses de propagation sur l'arrière de l'incendie à moins de 0,025 m/mn; toutefois, en raison de ces faibles vitesses, il est probable que l'arrière de l'incendie s'éteigne spontanément. Cette façon de procéder supprime les relations antérieures entre la vitesse de propagation sur l'arrière de l'incendie et le rapport de la longueur à la largeur. L'accélération de la propagation sur l'arrière de l'incendie à partir d'un foyer ponctuel est traitée de la même façon que la propagation du front de l'incendie, à l'aide des mêmes équations ([70] à [72]). Les distances de propagation sur l'arrière de l'incendie, quand ce dernier n'accélère pas, sont calculées de façon semblable à ce que permet l'équation [74], c'est-à-dire :

$$D_a = V_{p.a.} \times T \qquad (78)$$

où D_a égale la distance de propagation sur l'arrière de l'incendie (m); $V_{p.a.}$, la vitesse de propagation sur l'arrière de l'incendie (m/mn); T, le temps écoulé (mn).

8.4 Croissance de l'incendie elliptique

L'évolution de l'incendie ou la forme générale du terrain incendié en forêt à partir d'un seul foyer dépend largement de la vitesse du vent à la surface du sol. Pourvu que le sens du vent reste relativement constant, les incendies poussés par le vent brûlent un terrain à peu près elliptique ou ovale (figure 20), même si d'autres formes semblables ont été avancées (Anderson, 1983; Deacon, 1986).

Dans la Méthode PCI, on a adopté un modèle simple de croissance elliptique (Van Wagner, 1969) qui permet de mesurer la taille de l'incendie (aire et périmètre) à partir de la distance de propagation du front et de la vitesse du vent. Outre la direction constante du vent, on pose par hypothèse que le feu se propage dans un seul type de combustible, sur une pente uniforme et sans subir l'entrave d'opérations d'extinction.

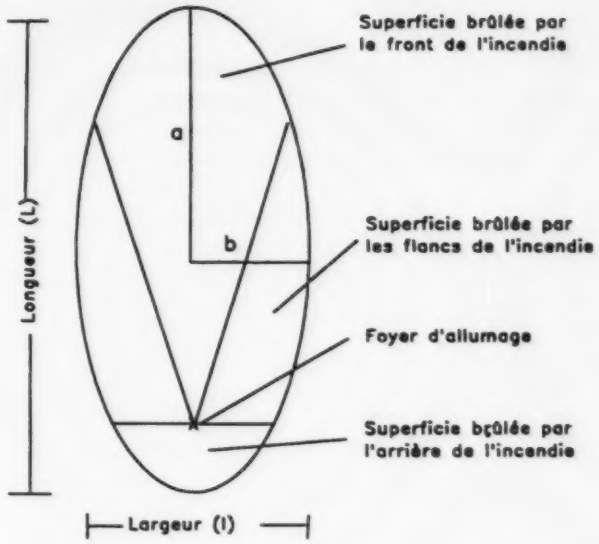


Figure 20. Schéma du modèle simple de croissance elliptique de l'incendie.

8.4.1 Forme de l'aire incendiée

La propriété la plus fondamentale d'un incendie elliptique est le rapport de la longueur à la largeur de l'aire incendiée (Alexander, 1985), que l'on calcule simplement par division de la longueur totale de l'aire par sa largeur maximale. Par exemple, le rapport de la longueur à la largeur de l'aire elliptique représentée à la figure 20 est d'environ 2. Selon la Méthode PCI, ce rapport sera simplement donné comme égal à 2,0. Cela signifie que l'aire incendiée est deux fois plus longue que large. Un rapport égal à l'unité signifie que l'aire incendiée est circulaire.

Une relation empirique a été élaborée (figure 21) pour déterminer le rapport de la longueur à la largeur dans les combustibles constitués de bois sur pied au lieu de passer par l'approche semi-théorique adoptée dans la version provisoire de 1984 de la méthode PCI. La nouvelle équation fondée sur les données rassemblées pour évaluer la fonction d'origine de la longueur à la largeur (Alexander, 1985) et les données supplémentaires ultérieures, prend la forme suivante (voir également la figure 21) :

$$L/l = 1{,}0 + 8{,}729 \times \left[1 - e^{-0{,}030 \times V_{r.v.}}\right]^{2{,}155} \qquad (79)$$

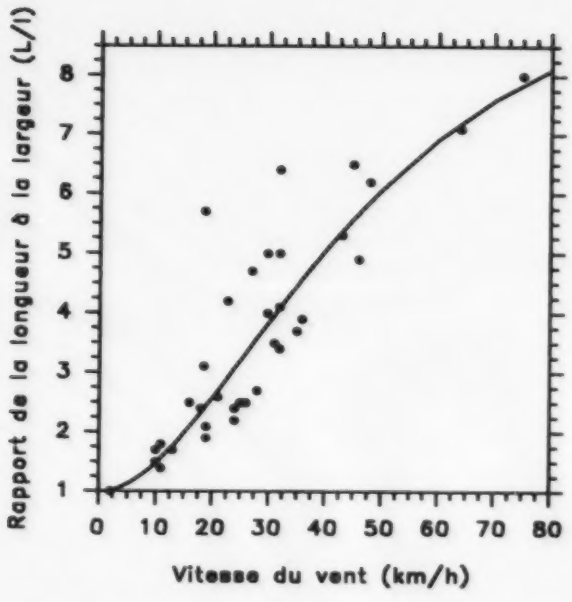


Figure 21. Rapport de la longueur à la largeur des aires incendiées elliptiques dans les peuplements forestiers et les rémanents, en fonction de la vitesse du vent. La courbe en S est la représentation graphique de l'équation [79].

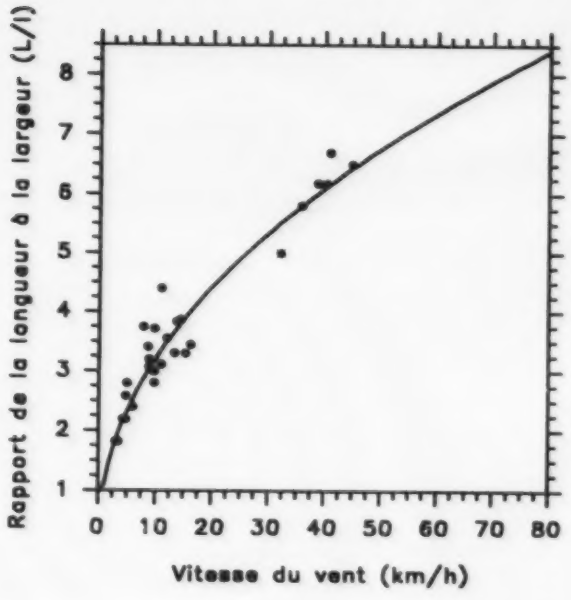


Figure 22. Rapport de la longueur à la largeur des aires incendiées elliptiques en fonction de la vitesse du vent dans deux types généraux de combustibles, selon les équations [79] et [80].

où $V_{r.v.}$ est la vitesse vectorielle résultante du vent (km/h) ou la vitesse observée du vent lorsque la pente est nulle. Cette relation se traduit par un rapport de la longueur à la largeur légèrement plus élevée que celle que donnait la formule d'origine, et elle ne pose aucune limite supérieure à la vitesse du vent. Toutefois, en raison de la forme de l'équation, le rapport de la longueur à la largeur finit par plafonner graduellement au maximum possible de 9,7.

L'équation du rapport de la longueur à la largeur pour les combustibles herbacés (O-1a et b) est comme suit (voir également la figure 22) :

$$L/l = 1{,}1 + V_{r.v.}^{0{,}464} \qquad V_{r.v.} \geq 1{,}0 \quad (80)$$

Prise directement de Cheney (1981), l'équation [80] se fonde sur l'analyse de feux expérimentaux et de feux échappés qui ont embrasé les prairies australiennes, selon les données de McArthur (1966). Cheney (1981) a souligné le fait que la relation était bonne pour les vents dont la vitesse pouvait atteindre 40 km/h, mais ni Luke et McArthur (1978) ni McArthur et collab. (1982) n'ont fixé de telle limite. À noter que lorsque le vecteur vent est inférieur à 1,0 km/h, la relation suivante s'applique :

$$L/l = 1{,}0 \qquad V_{r.v.} < 1{,}0 \quad (81)$$

8.4.2 Formulation d'un modèle simple de croissance elliptique de l'incendie

Van Wagner (1969) et Alexander (1985) ont discuté de la formulation d'équations du modèle de croissance elliptique à partir de formules mathématiques ordinaires. L'aire et le périmètre peuvent être définis en fonction de la distance de propagation du front, de l'arrière et des flancs de l'incendie. Compte tenu des vitesses de propagation, on peut décrire les deux demi-axes de la figure 20 par les équations suivantes :

$$a = \frac{(v + w) \times t}{2} \quad (82)$$

$$b = \frac{2 \times u \times t}{2} = u \times t \quad (83)$$

où a est le demi-axe long de l'ellipse; b, le demi-axe court; v, la vitesse de propagation du front de l'incendie; w, la vitesse de propagation sur l'arrière de l'incendie; u, la vitesse de propagation sur les flancs de

l'incendie et t, le temps écoulé depuis l'allumage de l'incendie. L'aire et le périmètre de l'ellipse peuvent être calculés à partir des équations suivantes (Van Wagner, 1969) :

$$A = \frac{\pi}{2} \times (v + w) \times u \times t^2 \tag{84}$$

$$P = \pi \times t \times \left(\frac{v + w}{2} + u \right) \times \left(1 + \frac{\acute{E}H^2}{4} \right) \tag{85}$$

où A est l'aire de l'ellipse (aire incendiée); $\acute{E}H$, le rapport $(a-b)/(a+b)$; v, w, u et t, les paramètres définis au paragraphe précédent.

McAlpine (1989) a montré que les indices de forme de l'incendie, tels que le rapport de la longueur à la largeur, n'étaient pas constants durant la croissance accélérée de l'incendie. D'abord circulaire, ce dernier prend graduellement sa forme elliptique. Aucune donnée n'est disponible sur le temps qu'il faut pour que le rapport final de la longueur à la largeur soit établi. Toutefois, par hypothèse, on pose que ce temps coïncide avec la vitesse de propagation à l'équilibre. Ainsi, on se méfiera des estimations de l'aire et du périmètre durant la croissance accélérée. Dans la réalité, le rapport de la longueur à la largeur à cette étape sera inférieur à la valeur prédite, ce qui donnera des incendies de forme plus circulaire et des prédictions de l'aire et du périmètre péchant par défaut.

8.4.3 Calcul de l'aire brûlée

L'équation permettant de calculer l'aire de l'ellipse incendié, décrit au paragraphe précédent, est comme suit :

$$A = \frac{\dfrac{\pi}{4 \times (L/l)} \times D_t^2}{10\,000} \tag{86}$$

où A est l'aire de l'ellipse (ha); L/l, le rapport de la longueur à la largeur; D_t, la distance totale de propagation de l'incendie (m) (la somme des distances de propagation sur l'avant et l'arrière).

La vitesse de croissance surfacique (Merrill et Alexander, 1987) ne reste pas constante, dans le temps, mais elle augmente plutôt en proportion directe de ce dernier. En supposant une vitesse constante de propagation, l'aire totale brûlée augmente en raison du carré du temps écoulé depuis l'allumage (Van Wagner, 1969). Par exemple, la superficie totale brûlée deux heures après l'allumage sera quatre fois plus grande que la superficie brûlée après une heure. La vitesse de croissance surfacique peut être exprimée par la superficie par unité de temps, par exemple en hectares à l'heure, pourvu que l'on comprenne bien que cette vitesse s'applique uniquement au moment dont on parle.

8.4.4 Calcul du périmètre

L'équation permettant de calculer le périmètre d'un incendie elliptique, décrit ci-dessus, est comme suit :

$$P = \pi \times \frac{D_t}{2} \times \left(1 + \frac{1}{(L/l)} \right) \times \left| 1 + \left(\frac{(L/l) - 1}{2\,[(L/l) + 1]} \right)^2 \right| \tag{87}$$

où P est le périmètre de l'ellipse (m); D_t, la distance totale de propagation de l'incendie (m); L/l, le rapport de la longueur à la largeur.

Contrairement à la vitesse de croissance surfacique, la vitesse de croissance du périmètre (Merrill et Alexander, 1987) reste constante dans le temps pourvu que la vitesse de propagation du front reste constante (Van Wagner, 1965). Ainsi, la vitesse de croissance du périmètre de l'incendie se calcule comme suit :

$$V_{c.p.} = \pi \times \frac{V_p + V_{p.a.}}{2} \times \left(1 + \frac{1}{(L/l)} \right) \times \left| 1 + \left(\frac{(L/l) - 1}{2[(L/l) + 1]} \right)^2 \right| \tag{88}$$

où $V_{c.p.}$ est la vitesse de croissance du périmètre (m/mn); V_p, la vitesse de propagation du front de l'incendie à l'équilibre (m/mn); $V_{p.a.}$, la vitesse de propagation sur l'arrière de l'incendie (m/mn); et L/l, le rapport de la longueur à la largeur. Même si la forme générale d'un incendie qui évolue librement peut être généralement représentée par une ellipse, en réalité, la longueur du périmètre tend à être sous-estimée par l'équation [88], à cause des irrégularités naturelles du front de l'incendie non considérées dans le modèle simple de croissance elliptique.

Tant que la vitesse de propagation à l'équilibre n'est pas atteinte (c'est-à-dire au cours de la période d'accélération), la vitesse de croissance du périmètre peut se calculer par l'intégration de la vitesse de propagation au moment t (équation [70]) dans l'équation [88]. Dans ce cas, la vitesse de croissance du périmètre est assujettie à la même restriction que la

vitesse de croissance surfacique, c'est-à-dire que la vitesse calculée ne vaut que pour le moment précis pour lequel elle est calculée.

8.4.5 Intensité de l'incendie, sur l'arrière et sur les flancs

Des auteurs (Catchpole et collab., 1982) ont traité de l'intensité de l'incendie aux environs de son périmètre. L'intensité de l'incendie, selon l'équation de Byram ($I=HwR$), en divers points du périmètre, dépend de la vitesse de propagation ainsi que du rapport de la longueur à la largeur, la chaleur de combustion étant constante et la consumation du combustible étant posée, par hypothèse, comme constante autour du périmètre. Comme le modèle de croissance elliptique permet de prédire la distance de propagation sur les flancs de l'incendie, à partir de la vitesse de propagation du front, du temps écoulé et du rapport de la longueur à la largeur, le calcul de la vitesse latérale de propagation est une simple formalité. Cette vitesse, au point le plus large de l'ellipse (voir la figure 20) se définit comme suit :

$$V_{l.p.} = \frac{V_p + V_{p.a.}}{(L/l) \times 2} \qquad (89)$$

où $V_{l.p.}$ est la vitesse latérale de propagation (m/mn); V_p, la vitesse de propagation en surface (m/mn); $V_{p.a.}$, la vitesse de propagation sur l'arrière de l'incendie (m/mn); L/l, le rapport de la longueur à la largeur.

Ayant déterminé les vitesses respectives de propagation de l'incendie en surface en ces points, on doit maintenant calculer l'intensité de l'incendie en surface, comme dans l'équation [69], en remplaçant la vitesse de propagation du front par la vitesse de propagation latérale ou par la vitesse de propagation rétrograde (arrière de l'incendie). La consumation du combustible de surface est posée comme constante, comme il a été précédemment mentionné. L'intensité de l'incendie sur ses flancs et sur son arrière est ensuite éprouvée de la même façon que l'intensité en surface du front a été éprouvée afin de déterminer le degré d'embrasement des cimes. Les valeurs calculées pour l'intensité sur les flancs et l'arrière de l'incendie ne comprennent pas seulement l'intensité de l'incendie mais également la fraction consumée des cimes, ce qui indique le degré (s'il y a lieu) d'embrasement des cimes (voir la section 7.5 sur la description de l'incendie).

Pour un incendie qui débute, lorsqu'une fonction d'accélération sert à déterminer la vitesse de propagation du front de l'incendie, il en faut également une pour les flancs de l'incendie. On se sert de l'équation [70], en remplaçant la vitesse de propagation à l'équilibre ($V_{p.éq.}$) par la vitesse de propagation sur les flancs et l'arrière et en procédant de la façon qui vient d'être décrite.

On peut, de la même manière, évaluer l'intensité de l'incendie et la vitesse de propagation en d'autres points du périmètre. Catchpole et collab. (1982) ont donné des équations pour mesurer la vitesse de propagation en tout point du périmètre d'un incendie elliptique, à partir de la vitesse de propagation du front ($V_{p.s.}$ dans notre cas) et le rapport de la longueur à la largeur. Ces vitesses de propagation pourraient être traitées de la même façon que les vitesses de propagation sur les flancs et l'arrière (c'est-à-dire confrontées à la vitesse critique de propagation, etc.) afin de déterminer l'intensité en tout point du périmètre de l'incendie. Cela, toutefois, ne fait pas partie de la Méthode PCI, puisque l'opération exige des calculs mathématiques longs et complexes pour chaque estimation de l'intensité ainsi que d'autres valeurs de départ.

9.0 Remarques finales

La présente version de la Méthode PCI réunit la meilleure information disponible sur le comportement des incendies de forêt au Canada. Aboutissement de 25 années de recherche de Forêts Canada, elle traduit la voie d'approche traditionnelle canadienne qui consiste à rassembler des données détaillées sur le comportement des incendies grâce à des programmes de brûlage expérimental étayés d'observations d'incendies réels pour construire, en passant par une démarche statistique, des modèles qui sont fidèles à la théorie physique. Même si la Méthode PCI donne aux responsables de la lutte contre l'incendie au Canada des renseignements localisés sur le comportement des incendies pour certains types de combustibles importants, il est vital que les organismes de lutte contre les incendies continuent de surveiller les incendies de forêt et de se documenter à leur égard afin de vérifier les relations existantes et de fournir des renseignements indispensables à la construction des modèles ultérieurs. La recherche d'une prévision améliorée du comportement des incendies exigera l'appui indéfectible de la part des organismes de lutte contre les incendies, c'est-à-dire un appui logistique et une suite continue d'évaluations et de rétroactions.

La Méthode PCI vise à compléter plutôt qu'à remplacer l'expérience et le jugement des responsables de la lutte. Les organismes qui allient de façon systématique les données produites par la Méthode PCI au fruit de l'expérience locale et à des systèmes

améliorés d'aide à la décision seront ceux qui en profiteront le plus. L'utilisation efficace d'un moyen de prédiction quantitative du comportement des incendies exige des améliorations continues dans la prévision des conditions météorologiques propices aux incendies, dans la collecte de données sur ces conditions ainsi que dans la capacité de traiter l'information. Les systèmes d'information pour la lutte contre les incendies qui intègrent les moyens de prédire le comportement des incendies à l'échelon local aux lignes directrices d'aide à la décision devraient faire la preuve de leur utilité pour améliorer l'efficacité de la lutte dans l'ensemble du Canada.

10.0 Bibliographie

Alexander, M.E. 1982. Diurnal adjustment table for the Fine Fuel Moisture Code. Environ. Can., Can. For. Serv., North. For. Res. Cent., Edmonton, Alta. For. Manage. Note No. 17. 3 p.

Alexander, M.E. 1985. Estimating the length-to-breadth ratio of elliptical forest fire patterns. Pages 287-304 *in* Proc. Conf. Fire For. Meteorol. (Apr. 29–May 2, Detroit, Mich.). Soc. Am. For., Bethesda, Md. SAF Publ. 85-04.

Alexander, M.E.; Lanoville, R.A. 1989. Predicting fire behavior in the black spruce–lichen woodland fuel type of western and northern Canada. For. Can., North. For. Cent., Edmonton, Alta., and Gov. N.W.T. Dep. Renewable Resour., Territ. For. Fire Cent., Fort Smith, N.W.T. Poster (with text).

Alexander, M.E.; Lee, B.S.; Lee, C.Y. 1984. Hourly calculation of the Fine Fuel Moisture Code, Initial Spread Index, and Fire Weather Index with the Texas Instruments model 59 hand-held calculator. Agric. Can., Can. For. Serv., North. For. Res. Cent., Edmonton, Alta. Study Nor-5-191 File Rep. No. 7. 17 p.

Alexander, M.E.; Smith, R.M.; Mann, C.L. 1988. A diagrammatic guide to elliptical shapes of wildland fires. Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton, Alta. Technol. Transfer Note A-002. 4 p.

Anderson, H.E. 1983. Predicting wind-driven wild land fire size and shape. USDA For. Serv., Intermt. For. Range Exp. Stn., Ogden, Utah. Res. Pap. INT-305. 26 p.

Blanc, M. 1987. Glossaire de termes employés en gestion des feux de forêt, 4e éd. Conseil national de recherches du Canada, Comité canadien de gestion des feux de forêts, Ottawa (Ontario). Publ. CNRC 26517. 69 p.

Byram, G.M. 1959. Combustion of forest fuels. Pages 61–89 *in* K.P. Davis, ed., Forest fire: control and use. McGraw-Hill Book Co., New York.

Canadian Forestry Service. 1973. Adjusted Fine Fuel Moisture Code and Fire Weather Index for times throughout the day. Environ. Can., Can. For. Serv., Pac. For. Res. Cent., Victoria, B.C. Can. For. Fire Behav. Syst. Suppl. BC-6. 3 p.

Canadian Forestry Service. 1974. Adjusted Fine Fuel Moisture Code and Fire Weather Index for times throughout the day. Environ. Can., Can. For. Serv., Great Lakes For. Res. Cent., Sault Ste. Marie, Ont. Can. For. Fire Behav. Syst. Suppl. ONT-3. 3 p.

Canadian Forestry Service. 1987. Canadian Forest Fire Danger Rating System—users' guide. Agric. Can., Can. For. Serv. Fire Danger Group, Ottawa, Ont. Three-ring binder (unnumbered publication).

Catchpole, E.A.; de Mestre, N.J.; Gill, A.M. 1982. Intensity of fire at its perimeter. Aust. For. Res. 12:47–54.

Cheney, N.P. 1981. Fire behaviour. Pages 151–75 *in* Fire and the Australian biota. Aust. Acad. Sci., Canberra, ACT.

Cheney, N.P.; Bary, G.A.V. 1969. The propagation of mass conflagrations in a standing eucalypt forest by the spotting process. Paper A6 *in* Collected Papers, Mass Fire Symp. (Feb. 10–12, Canberra, ACT.), Vol. I. Commonw. Aust., Defence Standards Lab., Maribyrnong, Vic.

Chrosciewicz, Z. 1986. Foliar moisture content variations in four coniferous tree species of central Alberta. Can. J. For. Res. 16:157–62.

Deacon, A. 1986. The shape of a fire burning under the influence of a constant wind. Aust. Defence Force Acad., Maths Dep., Campbell, ACT. Rep. 11/86. 29 p.

De Groot, W.J. 1988. Forest ecosystems in the mixedwood section of Saskatchewan and standard fuels for predicting fire behavior. For. Can., Can. For. Serv. Dist. Off., Prince Albert, Sask. Technol. Transfer Note S-003. 4 p.

Fuglem, P.L.; Murphy, P.J. 1980. Foliar moisture content and crown fires in Alberta. Univ. Alberta, Dep. For. Sci.

Gary, H.L. 1971. Seasonal and diurnal changes in moisture contents and water deficits in Engelmann spruce needles. Bot. Gaz. 132(4):327-32.

Kiil, A.D. 1971. Forest-habitat inventory requirements for fire danger rating. Pages 61–66 *in* Proc. Symp. Forest Land Inventory Manage. (Feb. 12-13, 1970, Edmonton, Alta.). Dep. Fish. For., Can. For. Serv., North. For. Res. Cent., Edmonton, Alta.

Lawson, B.D. 1972. An interpretive guide to the Canadian Forest Fire Behavior System. Environ. Can., Can. For. Serv., Pac. For. Res. Cent., Victoria, B.C. Rep. BCP-3-72. 19 p.

Lawson, B.D. 1977. Fire Weather Index — the basis for fire danger rating in British Columbia. Fish. Environ. Can., Can. For. Serv., Pac. For. Res. Cent., Victoria, B.C. Rep. BC-P-17. 24 p.

Lawson, B.D.; Stocks, B.J.; Alexander, M.E.; Van Wagner C.E. 1985. A system for predicting fire behavior in Canadian forests. Pages 6-16 *in* Proc. 8th Conf. Fire For. Meteorol. (Apr. 29–May 2, Detroit, Mich.). Soc. Am. For., Bethesda, Md. SAF Publ. 85-04.

Little, C.H.A. 1970a. Derivation of the springtime starch increase in balsam fir (*Abies balsamea*). Can. J. Bot. 48: 1995–99.

Little, C.H.A. 1970b. Seasonal changes in carbohydrate and moisture content in needles of balsam fir (*Abies balsamea*). Can. J. Bot. 48: 2021–28.

Little, C.H.A. 1974. Relationship between the starch gel level at budbreak and current shoot growth in *Abies balsamea* L. Can. J. For. Res. 4: 268–73.

Luke, R.H.; McArthur, A.G. 1978. Bushfires in Australia. Aust. CSIRO Div. For. Res. Aust. Gov. Publ. Serv., Canberra, ACT. 359 p.

Luke, R.H.; McArthur A.G. 1986. Bushfires in Australia. Rev. ed. Aust. Gov. Publ. Serv., Canberra, ACT. 359 p.

McAlpine, R.S. 1986. Forest fire growth calculator. Agric. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton, Alta. For. Manage. Note 35. 8 p.

McAlpine, R.S. 1987. Two BASIC programs for fire danger and fire behavior computations. Agric. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton, Alta. For. Manage. Note 43.

McAlpine, R.S. 1988. The acceleration of point source fire to equilibrium spread. M.Sc. Thesis, Univ. Montana, Missoula. 130 p.

McAlpine, R.S. 1989. Temporal variations in elliptical forest fire shapes. Can. J. For. Res. 19(11):1496–1500.

McAlpine, R.S.; Lawson, B.D.; Taylor, E. 1991. Fire spread across a slope. Pages 218–25 *in* Proc. 11th Conf. Fire For. Meteorol. (Apr. 16–19, Missoula, Mont.). Soc. Am. For., Bethesda, Md. SAF Publ.

McArthur, A.G. 1966. Weather and grassland fire behaviour. Commonw. Aust., Dep. Nat. Develop., For. Timber Bureau, For. Res. Inst., Canberra, ACT. Leafl. 100. 23 p.

McArthur, A.G. 1968. The effect of time on fire behaviour and fire suppression problems. S. Aust. Emergency Fire Serv., Keswick, S. Aust. E.F.S. Manual 1968:3–6, 10–13.

McArthur, A.G. 1973. Grassland Fire Danger Meter Mark IV. Aust. For. Timber Bur., For. Res. Inst., Canberra, ACT.

McArthur, A.G.; Cheney, N.P.; Barber J. 1982. The fires of 12 February 1977 in the western district of Victoria. Aust. CSIRO Div. For. Res., Canberra, ACT, and Country Fire Authority, Melbourne, Vic. Joint Rep. 73 p.

Merrill D.F.; Alexander, M.E., eds. 1987. Glossary of forest fire management terms. 4th ed. Natl. Res. Counc. Can., Can. Comm. For. Fire Manage., Ottawa, Ont. Publ. NRCC 26516. 91 p.

Muraro, S.J. 1969. A modular approach to a revised national fire danger rating system. *In* Contributions on the development of a National Fire Danger Rating System. Can. Dep. Fish. For., Can. For. Serv., For. Res. Lab., Victoria, B.C. Inf. Rep. BC-X-37. 18 p.

Muraro, S.J. 1975. Prescribed fire predictor. Environ. Can., Can. For. Serv., Pac. For. Res. Cent., Victoria, B.C. Slide-rule with text.

Quintilio, D. 1978. Fire behavior in natural forest stands. Pages 14–16 *in* Proc. Fire Ecol. Resour. Manage. Workshop (Dec. 6–7, 1977, Edmonton Alta.). Environ. Can., Can. For. Serv., North. For. Res. Cen., Edmonton, Alta. Inf. Rep. NOR-X-210.

Quintilio, D.; Fahnestock, G.R.; Dubé, D.E. 1977. Fire behavior in upland jack pine: the Darwin Lake Project. Fish. Environ. Can., Can. For. Serv., North. For. Res. Cent., Edmonton, Alta. Inf. Rep. NOR-X-174. 49 p.

Russell, R.N.; Turner, J.A. 1975. Foliar moisture trends during bud swelling and needle flush in British Columbia. Environ. Can., Can. For. Ser. Bi-Monthly Res. Notes 31:24–25.

Springer, E.A.; Van Wagner, C.E. 1984. The seasonal foliar moisture trend of black spruce at Kapuskasing, Ontario. Agric. Can., Can. Forest. Serv. Res. Notes 4:39–42.

Stocks, B.J. 1977. Fire behavior research in Ontario. USDA For. Serv., Washington, D.C. Fire Manage. Notes 38(2):9–11, 19.

Stocks, B.J. 1987a. Fire potential in the spruce budworm-damaged forests of Ontario. For. Chron. 63:8–14.

Stocks, B.J. 1987b. Fire behavior in immature jack pine. Can. J. For. Res. 17:80–86.

Stocks, B.J. 1989. Fire behavior in mature jack pine. Can. J. For. Res. 19:783–90.

Stocks, B.J.; Lawson, B.D.; Alexander, M.E.; Van Wagner, C.E.; McAlpine, R.S.; Lynham, T.J.; Dubé, D.E. 1989. Canadian Forest Fire Danger Rating System: an overview. For Chron. 65(4):258–65.

Thomas, P.H.; Simms, D.L.; Wraight, H.G.H. 1964. Fire spread in wooden cribs. Joint Fire Research Organization, Boreham Wood, United Kingdom. Fire Res. Note 537.

Van Wagner, C.E. 1965. Describing forest fires — old ways and new. For. Chron. 41:301–305.

Van Wagner, C.E. 1967. Seasonal variation in moisture content of eastern Canadian tree foliage and the possible effect on crown fires. Can. Dep. For. Rural Develop., Forest. Br. Publ. 1204.

Van Wagner, C.E. 1969. A simple fire-growth model. For. Chron. 45:103–104.

Van Wagner, C.E. 1971. Two solitudes in forest fire research. Environ. Can., Can. For. Serv., Petawawa For. Exp. Stn., Chalk River, Ont. Inf. Rep. PS-X-29. 7 p.

Van Wagner, C.E. 1972. A table of diurnal variation in the Fine Fuel Moisture Code. Environ. Can., Can. For. Serv., Petawawa For. Exp. Stn., Chalk River, Ont. Inf. Rep. PS-X-38. 8 p.

Van Wagner, C.E. 1974a. Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index. Environ. Can., Can. For. Serv., Ottawa, Ont. Publ. No. 1333. 44 p.

Van Wagner, C.E. 1974b. A spread index for crown fires in spring. Environ. Can., Can. Forest. Serv., Petawawa For. Exp. Stn. Info. Rep. PS-X-55. 11 p.

Van Wagner, C.E. 1975. A comparison of the Canadian and American forest fire danger rating systems. Environ. Can., Can. For. Serv., Petawawa For. Exp. Stn., Chalk River, Ont. Inf. Rep. PS-X-59. 22 p.

Van Wagner, C.E. 1977a. A method of computing fine fuel moisture content throughout the diurnal cycle. Fish. Environ. Can., Can. For. Serv., Petawawa For. Exp. Stn., Chalk River, Ont. Inf. Rep. PS-X-69. 15 p.

Van Wagner, C.E. 1977b. Conditions for the start and spread of crown fire. Can. J. For. Res. 7(1):23-24.

Van Wagner, C.E. 1977c. Effect of slope on fire spread rate. Environ. Can., Can. For. Serv. Bi-Monthly Res. Notes 33:7–8.

Van Wagner, C.E. 1977d. In readers' forum. Fire Technol. 13:349–50

Van Wagner, C.E. 1987. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Agric. Can., Can. For. Serv., Ottawa, Ont. For. Tech. Rep. 35. 37 p.

Van Wagner, C.E. 1989. Prediction of crown fire behavior in conifer stands. Pages 207–212 *in* Proc. 10th Conf. Fire For. Meteorol., April 17–21, 1989, Ottawa, Ont.

Van Wagner, C.E.; Pickett, T.L. 1985. Equations and FORTRAN program for the Canadian Forest Fire Weather Index System. Agric. Can., Can. For. Serv., Ottawa, Ont. For. Tech. Rep. 33. 18 p.

Weber, R.O. 1989. Analytical models for fire spread due to radiation. Combust. Flame 78:398–408.

Wright, J.G.; Beall, H.W. 1938. Grass-fire hazard tables for eastern Canada. Can. Dep. Mines Resour., Lands, Parks, Forests Br. For. Fire Res. Note 6.

Annexe I. Liste des équations

COMPOSANTES PRINCIPALES

Humidité foliaire

$$LATIT._n = 46 + 23{,}4 \times e^{-0{,}0360 \times (150 - LONG.)} \quad (1)$$

$$D_0 = 151 \times \left(\frac{LATIT.}{LATIT._n} \right) \quad (2)$$

$$LATIT._n = 43 + 33{,}7 \times e^{-0{,}0351 \times (150 - LONG.)} \quad (3)$$

$$D_0 = 142{,}1 \times \left(\frac{LATIT.}{LATIT._n} \right) + 0{,}0172 \times ALT. \quad (4)$$

$$N_j = \left| D_j - D_0 \right| \quad (5)$$

$$HF = 85 + 0{,}0189 \times N_j^2 \qquad N_j < 30 \quad (6)$$

$$HF = 32{,}9 + 3{,}17 \times N_j - 0{,}0288 \times N_j^2 \qquad 30 \leq N_j < 50 \quad (7)$$

$$HF = 120 \qquad N_j \geq 50 \quad (8)$$

Consumation du combustible de surface

C-1

$$CCS = 1{,}5 \times \left[1 - e^{(-0{,}230 \times (ICL - 81))} \right] \quad (9)$$

Si $CCS < 0$, alors poser $CCS = 0$.

C-2, M-3 et M-4

$$CCS = 5{,}0 \times \left[1 - e^{(-0{,}0115 \times ICD)} \right]^{1{,}00} \quad (10)$$

C-3 ou C-4

$$CCS = 5{,}0 \times \left[1 - e^{(-0{,}0164 \times ICD)} \right]^{2{,}24} \quad (11)$$

C-5 ou C-6

$$CCS = 5{,}0 \times \left[1 - e^{(-0{,}0149 \times ICD)} \right]^{2{,}48} \quad (12)$$

C-7 — Calculer la consumation du combustible du sol forestier (*CCSF*) et la consumation du combustible ligneux (*CCL*) séparément et les additionner pour obtenir la consumation totale du combustible de surface (*CCS*) :

$$CCSF = 2 \times \left[1 - e^{(-0{,}104 \times [ICL - 70])}\right] \tag{13}$$

Si $CCSF < 0$, alors poser $CCSF = 0$.

$$CCL = 1{,}5 \times \left[1 - e^{(-0{,}0201 \times ICD)}\right] \tag{14}$$

$$CCS = CCSF + CCL \tag{15}$$

D-1

$$CCS = 1{,}5 \times \left[1 - e^{(-0{,}0183 \times ICD)}\right] \tag{16}$$

M-1 ou M-2

$$CCS = \left[\frac{\%C}{100} \times (CCS \text{ pour C-2})\right] + \left[\frac{\%F}{100} \times (CCS \text{ pour D-1})\right] \tag{17}$$

O-1

$$CCS = QCH \tag{18}$$

S-1

$$CCSF = 4{,}0 \times \left[1 - e^{(-0{,}025 \times ICD)}\right] \tag{19}$$

$$CCL = 4{,}0 \times \left[1 - e^{(-0{,}034 \times ICD)}\right] \tag{20}$$

S-2

$$CCSF = 10{,}0 \times \left[1 - e^{(-0{,}013 \times ICD)}\right] \tag{21}$$

$$CCL = 6{,}0 \times \left[1 - e^{(-0{,}060 \times ICD)}\right] \tag{22}$$

S-3

$$CCSF = 12{,}0 \times \left[1 - e^{(-0{,}0166 \times ICD)}\right] \tag{23}$$

$$CCL = 20{,}0 \times \left[1 - e^{(-0{,}0210 \times ICD)}\right] \tag{24}$$

Tous les types de rémanents

$$CCS = CCSF + CCL \tag{25}$$

Équations de la vitesse de propagation

Équation générale de la vitesse de propagation

C-1 à C-5 ainsi que C-7

$$V_{i.p.} = a \times \left[1 - e^{(-b \times IPI)}\right]^c \tag{26}$$

Équations de la vitesse de propagation s'appliquant à un combustible spécifique

M-1 (sans feuilles)

$$V_{i.p.} = \left[\frac{\%C}{100} \times (V_{i.p.} \text{ pour C} - 2)\right] + \left[\frac{\%F}{100} \times (V_{i.p.} \text{ pour D} - 1)\right] \tag{27}$$

M-2 (avec feuilles)

$$V_{i.p.} = \left[\frac{\%C}{100} \times (V_{i.p.} \text{ pour C} - 2)\right] + 0{,}2 \times \left[\frac{\%F}{100} \times (V_{i.p.} \text{ pour D} - 1)\right] \tag{28}$$

Voir le tableau à la fin de la présente annexe pour la liste complète des valeurs des paramètres de régression propres aux types de combustibles.

Coefficients de la vitesse de propagation pour les combustibles M-3 et M-4

M-3

$$a = 170 \times e^{\left(\frac{-35{,}0}{\%S_{b.m.}}\right)} \tag{29}$$

$$b = 0{,}082 \times e^{\left(\frac{-36{,}0}{\%S_{b.m.}}\right)} \tag{30}$$

$$c = 1{,}698 - 0{,}00303 \times \%S_{b.m.} \tag{31}$$

M-4

$$a = 140 \times e^{\left(\frac{-35{,}5}{\%S_{b.m.}}\right)} \tag{32}$$

$$b = 0{,}0404 \tag{33}$$

$$c = 3{,}02 \times e^{(-0{,}00714 \times \%S_{b.m.})} \tag{34}$$

O-1 (herbes)

$$C_{f.h.} = 0{,}02 \times \%Fan. - 1{,}0 \qquad \%Fan. > 50 \tag{35}$$

Si $\%Fan. \leq 50$, alors $C_{f.h.} = 0$.

$$V_p = a \times \left[1 - e^{(-b \times IPI)}\right]^c \times C_{f.h.} \tag{36}$$

Effet de la pente sur la vitesse de propagation

$$\%\text{ de pente du terrain} = \frac{\text{dénivellation}}{\text{distance horizontale}} \times 100 \tag{37}$$

$$\%\text{ de pente du terrain} = 100 \times \tan(\alpha) \tag{38}$$

$$CP = e^{3{,}533 \times \left(\frac{\%P}{100}\right)^{1{,}2}} \qquad \%P < 60 \tag{39}$$

$$V_{p.c.} = V_{p.z.} \times CP \tag{40}$$

$$IPI_{p.z.} = \frac{\ln\left[1 - \left(\frac{V_{p.c.}}{a}\right)^{\frac{1}{c}}\right]}{-b} \tag{41}$$

$$IPI_{p.z.} = \frac{\ln\left[1 - \left(\frac{100 - V_{p.c.}}{\%C \times a}\right)^{\frac{1}{c}}\right]}{-b} \tag{42}$$

$$IPI_{p.z.} = \frac{\ln\left[1 - \left(\frac{V_{p.c.}}{C_{f.h.} \times a}\right)^{\frac{1}{c}}\right]}{-b} \tag{43}$$

$$\acute{E}VV = \frac{\ln\left[\frac{IPI_{p.z.}}{0{,}208 \times f(ICL)}\right]}{0{,}05039} \tag{44}$$

Fonction *f(ICL)* d'après le calcul de l'*IPI* (de la Méthode de l'IFM)

$$f(ICL) = 91{,}9 \times e^{(-0{,}1386 \times m)} \times \left[1 + \frac{m^{5{,}31}}{4{,}93 \times 10^{7}}\right] \tag{45}$$

où

$$m = \frac{147{,}2 \times (101 - ICL)}{59{,}5 + ICL} \tag{46}$$

Calcul de l'équivalent de la vitesse du vent (ÉVV)

$$VV_x = \left[V_v \times \sin(Az._v)\right] + \left[\acute{E}VV \times \sin(Az._p)\right] \tag{47}$$

$$VV_y = \left[V_v \times \cos(Az._v)\right] + \left[\acute{E}VV \times \cos(Az._p)\right] \tag{48}$$

$$V_{r.v.} = \sqrt{(VV_x^2 + VV_y^2)} \tag{49}$$

$$Az_{v.r.} = \arccos\left(\frac{VV_y}{V_{r.v.}}\right) \tag{50}$$

Si $VV_x < 0$, alors

$$Az_{v.r.} = 360 - Az_{v.r.} \tag{51}$$

Équation de l'*IPI* (de la Méthode de l'IFM)

$$IPI = 0{,}208 \times f(V) \times f(ICL) \tag{52}$$

où

$$f(V) = e^{0{,}05039 \times V_{r.v.}} \tag{53}$$

Si $V_v > 40$, alors

$$f(V) = 12 \times \left[1 - e^{-0{,}0818 \times (V_{r.v.} - 28)}\right] \tag{53a}$$

Effet de l'*ICD* sur la vitesse de propagation de l'incendie en surface

$$EA = e^{\left[50 \times \ln(q) \times \left(\frac{1}{ICD} - \frac{1}{ICD_0}\right)\right]} \tag{54}$$

$$V_p = V_{i.p.} \times EA \tag{55}$$

Intensité critique de l'incendie de surface

$$ICS = 0{,}001 \times HBC^{1,5} \times (460 + 25{,}9 \times HF)^{1,5} \tag{56}$$

$$V_{c.s.} = \frac{ICS}{300 \times CCS} \tag{57}$$

$$FCC = 1 - e^{-0{,}23 \times (V_p - V_{c.s.})} \tag{58}$$

Vitesse de propagation en plantation de conifères (C-6)

$$T = 1\,500 - 2{,}75 \times HF \tag{59}$$

$$h = 460 + 25{,}9 \times HF \tag{60}$$

$$EHF = \frac{(1{,}5 - 0{,}00275 \times HF)^{4{,}0}}{460 + (25{,}9 \times HF)} \times 1000 \tag{61}$$

$$V_{i.p.} = 30 \times \left(1 - e^{-0{,}08 \times IPI}\right)^{3{,}0} \tag{62}$$

$$V_{p.s.} = V_{i.p.} \times EA \tag{63}$$

$$V_{f.c.} = 60 \times \left(1 - e^{-0{,}0497 \times IPI}\right)^{1{,}00} \times \frac{EHF}{EHF_{moy.}} \tag{64}$$

$$V_p = V_{p.s.} + FCC \times (V_{f.c.} - V_{p.s.}) \tag{65}$$

Consumation totale de combustible

$$CC = QCC \times FCC \tag{66}$$

$$CTC = CCS + CC \tag{67}$$

Intensité de l'incendie

$$I = HwR \tag{68}$$

$$II = 300 \times CC \times V_p \tag{69}$$

COMPOSANTES SECONDAIRES

Accélération de l'incendie jusqu'à l'équilibre

$$V_{p.t.} = V_{p.\,éq.} \times \left(1 - e^{-\alpha t}\right) \tag{70}$$

$$D = V_{p.\,éq.} \times \left(t + \frac{e^{-\alpha t}}{\alpha} - \frac{1}{\alpha}\right) \tag{71}$$

$$\alpha = 0{,}115 - 18{,}8 \times FCC^{2{,}5} \times e^{(-8 \times FCC)} \tag{72}$$

$$T_t = \frac{\ln\left(1 - \frac{V_{c.s.}}{V_p}\right)}{-a} \tag{73}$$

Distance de propagation du front et de l'arrière de l'incendie

$$D_f = V_p \times T \tag{74}$$

$$f(V_{i.a.}) = e^{-0,05039 \times V_{r.v.}} \tag{75}$$

$$IPI_a = f(V_{i.a.}) \times f(ICL) \times 0,208 \tag{76}$$

$$V_{p.a.} = a \times \left(1 - e^{-b \times IPI_a}\right)^c \times EA \tag{77}$$

$$D_a = V_{p.a.} \times T \tag{78}$$

Rapport de la longueur à la largeur

Pour tous les types de combustibles sauf O-1

$$L/l = 1,0 + 8,729 \times \left[1 - e^{-0,030 \times V_{r.v.}}\right]^{2,155} \tag{79}$$

Combustibles ouverts (O-1)

$$L/l = 1,1 + V_{r.v.}^{0,464} \qquad V_{r.v.} \geq 1,0 \tag{80}$$

$$L/l = 1,0 \qquad V_{r.v.} < 1,0 \tag{81}$$

Détermination de l'aire incendiée et de son périmètre

$$a = \frac{(v + w) \times t}{2} \tag{82}$$

$$b = \frac{2 \times u \times t}{2} = u \times t \tag{83}$$

$$A = \frac{\pi}{2} \times (v + w) \times u \times t^2 \tag{84}$$

$$P = \pi \times t \times \left(\frac{v + w}{2} + u \right) \times \left(1 + \frac{\acute{E}H^2}{4} \right) \tag{85}$$

$$A = \frac{\frac{\pi}{4 \times (L/l)} \times D_t^2}{10\,000} \tag{86}$$

$$P = \pi \times \frac{D_t}{2} \times \left(1 + \frac{1}{(L/l)} \right) \times \left[1 + \left(\frac{(L/l) - 1}{2\,[(L/l) + 1]} \right)^2 \right] \tag{87}$$

$$V_{c.p.} = \pi \times \frac{V_p + V_{p.a.}}{2} \times \left(1 + \frac{1}{(L/l)} \right) \times \left[1 + \left(\frac{(L/l) - 1}{2\,[(L/l) + 1]} \right)^2 \right] \tag{88}$$

Vitesse de propagation latérale de l'incendie

$$V_{l.p.} = \frac{V_p + V_{p.a.}}{(L/l) \times 2} \tag{89}$$

Tableau A1. Valeur des paramètres de la vitesse de propagation pour chaque type de combustible

Type de combustible	*a*	*b*	*c*	*q*	ICD_0	*HBC* (m)	*QCC* (kg/m²)
C-1	90	0,0649	4,5	0,90	72	2	0,75
C-2	110	0,0282	1,5	0,70	64	3	0,80
C-3	110	0,0444	3,0	0,75	62	8	1,15
C-4	110	0,0293	1,5	0,80	66	4	1,20
C-5	30	0,0697	4,0	0,80	56	18	1,20
C-6	30	0,0800	3,0	0,80	62	7	1,80
C-7	45	0,0305	2,0	0,85	106	10	0,50
D-1	30	0,0232	1,6	0,90	32	*	*
M-1	*	*	*	0,80	50	6	0,80
M-2	*	*	*	0,80	50	6	0,80
M-3	*	*	*	0,80	50	6	0,80
M-4	*	*	*	0,80	50	6	0,80
S-1	75	0,0297	1,3	0,75	38	*	*
S-2	40	0,0438	1,7	0,75	63	*	*
S-3	55	0,0829	3,2	0,75	31	*	*
O-1a	190	0,0310	1,4	1,00	01	*	*
O-1b	250	0,0350	1,7	1,00	01	*	*

HBC : hauteur de la base de la couronne; *QCC* : quantité de combustible dans les cimes; * : valeurs non applicables.

Annexe II. Liste des symboles

Composantes principales

Pente

Az_p	Azimut de la pente, vers le haut
CP	Coefficient de pente, vers le haut
$\% P$	Pourcentage de la pente du terrain

Vitesse du vent (km/h)

Az_v	Azimut du vent
$ÉVV$	Équivalent vitesse du vent de la pente
$V_{r.v.}$	Vitesse résultante du vent (vectorielle)
V_v	Vitesse observée du vent
VV_x	Vitesse vectorielle nette du vent dans la direction de l'axe des x
VV_y	Vitesse vectorielle nette du vent dans la direction de l'axe des y

Indice de propagation initiale (*IPI*)

$f(ICL)$	Fonction de l'indice du combustible léger dans l'*IPI*
$f(V)$	Fonction du vent dans l'*IPI*
$f(V_{i.a.})$	Fonction du vent pour l'arrière de l'incendie
IPI	*IPI* final, compte tenu du vent et de la pente
IPI_a	*IPI* servant à calculer la vitesse de propagation sur l'arrière de l'incendie
$IPI_{p.z.}$	*IPI* vers le haut de la pente par vent nul
$IPI_{v.z.}$	*IPI* sur terrain horizontal par vent nul

Vitesse de propagation de l'incendie (m/mn)

a, b, c	Coefficients de l'équation de la vitesse de propagation
$Az_{.v.r.}$	L'azimut de la direction de propagation
$C_{f.h.}$	Fonction de fanage des combustibles herbacés
$V_{c.s.}$	Vitesse critique de propagation pour l'embrasement des cimes
$V_{f.c.}$	Vitesse de propagation du feu de cimes (C-6)
$V_{i.p.}$	Vitesse initiale de propagation sans effet de l'indice du combustible disponible
$V_{l.p.}$	Vitesse latérale de propagation
V_p	Vitesse de propagation finale, en surface ou dans les cimes
$V_{p.a.}$	Vitesse de propagation sur l'arrière de l'incendie
$V_{p.c.}$	Vitesse de propagation en surface, vers le haut de la pente, par vent nul
$V_{p.s.}$	Vitesse de propagation à la surface du sol (C-6)
$V_{p.z.}$	Vitesse de propagation en surface par vent nul sur terrain horizontal

Consumation du combustible (kg/m²)

CC	Consumation du combustible des cimes
CCL	Consumation du combustible ligneux
CCS	Consumation totale du combustible de surface
CCSF	Consumation du combustible du sol forestier
CTC	Consumation totale du combustible

Intensité de l'incendie (kW/m)

ICS	Intensité critique de l'incendie de surface pour l'embrasement des cimes
IFI	Intensité du front de l'incendie
IIA	Intensité sur l'arrière de l'incendie (modèle elliptique)
IIL	Intensité de l'incendie sur ses flancs (modèle elliptique)
IIS	Intensité de l'incendie de surface

Humidité foliaire

ALT.	Altitude, c'est-à-dire hauteur par rapport au niveau moyen de la mer
D_j	Numéro de la journée dans l'année
D_0	Numéro de la journée dans l'année où l'humidité foliaire est minimale
HF	Humidité foliaire (%)
LATIT.	Latitude (degrés)
$LATIT._n$	Latitude normalisée (degrés)
LONG.	Longitude (degrés)
N_j	Nombre de jours entre la date considérée et D_0

Paramètres des feux de cimes

EHF	Effet de l'humidité foliaire
FCC	Fraction consumée des cimes
HBC	Hauteur de la base de la couronne (m)
QCC	Quantité de combustible dans les cimes (kg/m²)

Effet de l'indice du combustible disponible (*ICD*)

EA	Effet de l'accumulation sur la vitesse de propagation
ICD	Indice du combustible disponible
q	Proportion de la vitesse maximale de propagation quand l'*ICD* = 50

Type de combustible et humidité de ce dernier

ÉH	Équivalent d'humidité de l'*ICL* (%)
ICL	Indice du combustible léger
QCH	Quantité de combustible herbacé (kg/m²)
%C	Pourcentage de conifères (forêt mixte: M-1, M-2)

$\%F$	Pourcentage de feuillus (forêt mixte: M-1, M-2)
$\%Fan.$	Pourcentage de fanage des herbes
$\%S_{b.m.}$	Pourcentage de sapins baumiers morts (forêt mixte: M-3, M-4)

Composantes secondaires

Foyers ponctuels

a	Fonction alpha commandant la fonction d'accélération
$V_{p.éq.}$	Vitesse de propagation à l'équilibre
$V_{p.t.}$	Vitesse de propagation au temps écoulé t (m/mn)
t	Temps écoulé depuis le début de l'incendie ponctuel (mn)
T_t	Temps écoulé depuis le début du feu de cimes (mn)

Forme de l'incendie

L/l	Rapport de la longueur à largeur

Distances de propagation

D_a	Distance de propagation sur l'arrière de l'incendie (m)
D_f	Distance de propagation sur le front de l'incendie (m)
D_t	Distance totale de propagation de l'incendie ($D_a + D_f$)
T	Temps écoulé depuis l'allumage (mn)

Aire et périmètre

A	Aire incendiée elliptique (ha)
P	Périmètre de l'aire incendiée elliptique (m)
$V_{c.p.}$	Vitesse de croissance du périmètre (m/mn)
π	Constante mathématique : 3,141 592 7

Forêts Canada

Forêts Canada est l'organisme principal en matière de foresterie à l'intérieur du gouvernement fédéral. Chef de file sur le plan national, il assure la préparation, la coordination et la mise en œuvre des politiques et des programmes fédéraux dans le but d'améliorer les avantages économiques, sociaux et environnementaux à long terme offerts aux Canadiens par le secteur forestier.

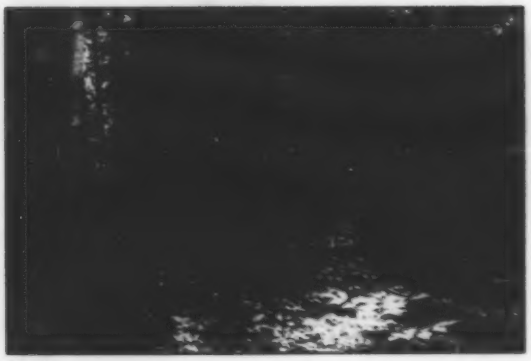
Forêts Canada est une organisation décentralisée: six régions, deux instituts de recherche nationaux ainsi que sept sous-bureaux régionaux sont répartis dans tout le Canada. L'administration centrale est établie dans la région de la Capitale nationale, à Hull (Québec).

Pour remplir son mandat, Forêts Canada assume les tâches suivantes:

- il administre les accords de développement forestier conclus avec les provinces
- il entreprend et appuie la recherche, la mise au point et le transfert technologique dans le domaine de la gestion, des normes d'utilisation et de l'environnement des forêts
- il rassemble, analyse et diffuse de l'information sur les ressources forestières nationales et internationales et les domaines connexes
- il fait des relevés des maladies et des insectes ravageurs des forêts canadiennes
- il fournit de l'information, des analyses et des conseils (quant aux politiques) concernant l'économie, l'industrie, les marchés et le commerce reliés au secteur forestier
- il favorise les occasions d'emploi et de formation universitaire et technique dans le secteur forestier
- il encourage les Canadiens à prendre conscience de tous les aspects du secteur forestier

Forêts Canada entretient des rapports sur une base régulière avec les gouvernements provinciaux et territoriaux, l'industrie, le monde du travail, les universités, les environnementalistes et le public par l'entremise d'organismes comme le Conseil canadien des ministres des Forêts, le Conseil consultatif du secteur forestier, le Conseil consultatif de la recherche forestière du Canada, le Comité de l'Inventaire des forêts du Canada, le Comité canadien de la gestion des incendies de forêt, le Centre interservices des feux de forêt du Canada et des comités consultatifs régionaux. Forêts Canada joue également un rôle actif dans des organismes internationaux de foresterie comme l'Union internationale des instituts de recherches forestières et l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture, de même qu'au sein de délégations de nature technique ou commerciale.

M-1



M-2

M-3

M-4

S-1

S-2

S-3

O-1